

UNIVERSITE DE SHERBROOKE  
Faculté de Génie  
Département de génie électrique et de génie informatique

Analyse des apports et besoins énergétiques d'un bâtiment isolé et enjeux  
éthiques associés pour développer des stratégies de gestion d'énergie  
centrées sur les solutions de stockage pour viser l'autonomie complète

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie électrique

Jules VOISIN

Sherbrooke, Québec, Canada  
Septembre 2018



## MEMBRES DU JURY

Vincent AIMEZ

---

Directeur

Céline VERCHERE

---

Codirectrice

Abdelatif JAOUAD

---

Rapporteur

Sousso KELOUWANI

---

Membre externe

# RESUME

Ces dernières années, la difficulté accrue d'exploiter les gisements de combustibles fossiles combinée au développement exponentiel du marché des **énergies renouvelables** amènent ces dernières à un coût historiquement bas. Ce contexte particulier suscite en parallèle le développement de bâtiments d'un genre nouveau, moins énergivores. Dans les régions isolées du monde, l'objectif ultime est alors de concevoir des infrastructures totalement autonomes.

A ce titre, ce projet de maîtrise présente une étude transversale sur la faisabilité de concevoir un bâtiment autonome, allant du dimensionnement général de l'installation, au développement de stratégies de gestion d'énergie utilisables en temps réel s'appuyant sur un modèle électrique précis, jusqu'à l'étude des enjeux éthiques associés à l'implantation réelle d'une telle installation.

Le **dimensionnement** général vise à déterminer les **caractéristiques** générales **des éléments de stockage** nécessaires pour garantir en tout temps une énergie électrique et thermique qui répond à la demande énergétique du bâtiment et de ces utilisateurs. Pour ce faire, un modèle thermique général du bâtiment est présenté, ainsi qu'un modèle permettant d'estimer en tout lieu l'énergie solaire disponible. Le dimensionnement du système est réalisé en utilisant un algorithme génétique qui vise à minimiser le prix total de l'installation, tout en garantissant un fonctionnement satisfaisant en tout temps. Ce dimensionnement s'appuie sur une simulation horaire réalisée à l'échelle d'une année.

Par la suite, un **modèle électrique** complet de l'installation est présenté et simulé sous Matlab/Simulink, permettant de réaliser une simulation dynamique du bâtiment autonome. Le modèle développé est structuré en utilisant le formalisme de Représentation Énergétique Macroscopique (REM), ainsi qu'une méthode de simplification permettant de diminuer efficacement le temps de simulation, tout en conservant un haut niveau de précision dans l'évolution des grandeurs énergétiques d'intérêts. Deux **stratégies de gestion applicables en temps réel** sont alors présentées et comparées.

Enfin, une **approche par les « usages responsables »** est présentée, afin de mettre en évidence les enjeux éthiques associés à l'implantation réelle du bâtiment autonome. Cette étude s'appuie sur des cas d'usages concrets au Canada, et sur une technologie émergente proposée par une start-up française.

**Mots clés :** Autonomie – usage – stockage – renouvelable – modélisation – gestion énergétique – Représentation Énergétique Macroscopique (REM)



# REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à mon directeur de recherche Monsieur Vincent AIMEZ pour m'avoir proposé ce sujet recherche, laissé libre dans sa réalisation tout au long de l'année, ainsi que pour m'avoir orienté et encadré tout au long de ce projet.

Je remercie chaleureusement Madame Céline VERCHERE, codirectrice, pour m'avoir encadré, aidé et conseillé dans la prise en considération des aspects éthiques.

J'exprime toute ma reconnaissance à mon équipe d'encadrement que sont Maxime DARNON, Maïté VOLATIER et Abdelatif JAOUAD pour m'avoir soutenu et guidé tout au long de l'année.

Un grand merci au professeur João Pedro TROVAO pour son aide précieuse dans la rédaction de deux articles scientifiques, ainsi que pour m'avoir guidé et permis de présenter à l'étranger mes travaux de recherche.

Je tiens enfin à remercier mes parents, mes sœurs et mon amie pour leur encouragement et soutien indéfectible durant toute l'année, ainsi que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au succès de ces travaux.

# TABLE DES MATIERES

MEMBRES DU JURY .....	iii
RESUME .....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
LISTE DES ABREVIATIONS .....	ix
LISTE DES TABLEAUX .....	xi
LISTE DES FIGURES .....	xii
INTRODUCTION .....	1
Chapitre 1 ETAT DE L'ART .....	3
1.1 Introduction .....	3
1.2 Estimation de la ressource solaire disponible .....	3
1.2.1 Détermination de l'irradiance totale .....	3
1.2.2 Détermination de la production électrique .....	6
1.3 Estimation du besoin énergétique du bâtiment .....	6
1.3.1 Estimation de la consommation énergétique d'un bâtiment .....	7
1.3.2 Construction de l'estimation de la consommation électrique de la maison .....	8
1.4 Modélisation électrique de la maison autonome .....	10
1.4.1 Présentation schématique d'un bâtiment autonome .....	10
1.4.2 Présentation de la Représentation Energétique Macroscopique .....	11
1.5 Stratégie de gestion d'énergie .....	12
1.6 Problématique et objectifs du projet .....	13
1.7 Approche de recherche .....	13
1.8 Conclusion du chapitre .....	14
Chapitre 2 DIMENSIONNEMENT DU BATIMENT AUTONOME .....	15
2.1 Résumé en français : .....	16
2.2 Abstract .....	16
2.3 Introduction .....	17
2.4 Modelling and optimal sizing strategy .....	19
2.4.1 Hybrid system configuration .....	19
2.4.2 Optimal Sizing Approach .....	20
2.4.3 Modelling of the hybrid system .....	24
2.5 Results and discussion .....	29

2.5.1	Solar resource estimation .....	29
2.5.2	Thermal demand of the building .....	31
2.6	Conclusion .....	40
2.7	Appendix A : Compared analysis on the orientation of the panels .....	40
2.8	Appendix B: Thermal matrix system and evaluation of the solar gain.....	42
2.9	Appendix C: Efficiency of the PV solar panels .....	44

## Chapitre 3 DEVELOPPEMENT DE STRATEGIES DE GESTION D'ENERGIE

.....	45
3.1    Résumé en français : .....	46
3.2    Abstract.....	46
3.3    Introduction.....	47
3.4    Methodology proposed .....	49
3.4.1   Hybrid system configuration.....	49
3.4.2   Methodology using Energetic Macroscopic Representation.....	49
3.5    Modelling of the hybrid system .....	50
3.5.1   Modelling of the Battery system: simplification and validation .....	51
3.5.2   Modelling of the PV system.....	53
3.5.3   Modelling of the electrolyzer system .....	54
3.5.4   Modelling of the PEM Fuel Cell system.....	57
3.5.5   Modelling of the Supercapacitor system.....	59
3.6    Energy Management Strategies for an Autonomous Building .....	60
3.6.1   Modelling of the whole Autonomous Building .....	60
3.6.2   Development of Energy Management Strategies.....	61
3.6.3   Results analysis and comparison of the proposed.....	68
3.7    Conclusion .....	73
3.8    Appendix A: EMR and graphical representation.....	74

## Chapitre 4 SENSIBILISATION AUX ENJEUX ET DEFIS SOCIAUX ET ETHIQUES .....

4.1	Introduction.....	75
4.2	Étude préliminaire et questions associées.....	76
4.2.1	Définition du concept : solution permettant de rendre une maison autonome en énergie et en eau .....	76
4.2.2	Fonctionnement du système :.....	76
4.2.3	Intérêt du concept : .....	77
4.2.4	Marché potentiel :.....	78
4.2.5	Rendre possible le concept retenu : .....	78
4.2.6	Enjeux préliminaires principaux .....	79
4.3	Approche par les Usages Responsables (Ur) appliquée au contexte québécois .....	80

4.3.1	Préalable : réglementation et intention d'innovation .....	80
4.3.2	Détermination des facteurs différenciants .....	82
4.3.3	Cas d'usage 1 : instrumentation d'un « espace » sur un site isolé au Canada .....	84
A)	Récapitulatif actions/moments qui suscitent un questionnement .....	86
B)	Points clés par rapport à la situation initiale .....	87
4.3.4	Cas d'usage 2 : instrumentation d'une maison raccordée au réseau électrique au Québec (Estrie).....	87
A)	Points clés par rapport à la situation initiale .....	87
B)	Parties prenantes concernées.....	88
4.3.5	Intention de l'entreprise et impact dans l'usage : autonomie vs écologie .....	88
A)	Impact souhaité : « augmenter l'autonomie » .....	88
B)	Impact souhaité : prise en compte de l'écologie.....	89
4.3.6	Synthèse de l'analyse .....	90
4.4	Compte Rendu du Workshop « Autonomie et bâtiments autonomes ».....	91
4.4.1	Axes innovants et impacts .....	91
A)	Cubes « intégrés » / kits d'éléments .....	91
B)	Multi-fluides / Mono fluides.....	92
C)	Utilisation d'une Intelligence Artificielle (=IA) / Absence IA.....	92
4.4.2	Conséquences de l'utilisation du produit dans les usages .....	93
4.4.3	Les défis à relever .....	94
4.5	Conclusion .....	97
	Conclusion générale .....	98
	Liste des références .....	100

# LISTE DES ABBREVIATIONS

$\varphi$  : latitude of the area ( $-90 \leq \varphi \leq 90$ )  
 $\delta$  : Solar declination ( $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ )  
 $\gamma$  : Surface azimuth angle ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  ;  $-90^\circ$ =due East)  
 $\beta$  : slope with respect to a horizontal plane. ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ )  
 $\omega$  : hourly solar angle  
 $\theta$  : solar incidence angle  
 $\theta_z$  : solar zenith  
 $R_b$  : Geometric factor  
SoC : State of Charge  
GA : Genetic Algorithm  
 $H_2$  : hydrogen  
 $H_2$ -tanks : hydrogen tanks  
 $H_2$ -SoC : state of charge of the  $H_2$ -tanks.  
MPPT : Maximum Power Point Tracker  
P : pressure (Pa)  
n : amount of substance (mole)  
V : volume ( $m^3$ )  
T : temperature (K)  
R : gas constant (8.314 J/K/mol)  
EMS : Energy management strategy  
PV : Photovoltaic  
Wp : Peak Power (feature of a PV panel)  
PF : Penalty Function  
EA : Evolutionary Algorithm  
PSO : particle swarm optimisation  
ACA : Ant colony Algorithm  
MILP : Mixed-Integer Linear Programming  
LPSP : Loss of Power Supply Probability  
DC : Direct current  
AC : Alternative current  
 $p_{battery}$  and  $p_{tank}$  : price respectively for batteries and  $H_2$ -tanks (USD\$/Wh)  
 $p_{PV}$ ,  $p_{electrolyzer}$ ,  $p_{turbine}$  : price respectively for the PV, electrolyzer and fuel cell turbine (USD\$/W)  
 $N_{batteries}$ ,  $N_{tanks}$  and  $N_{PV}$  : number of batteries, tanks and PV arrays  
 $E_{battery}$  and  $E_{tank}$  : rated energy that can be stored in a battery or a tank (Wh)  
 $P_{electrolyzer}$  and  $P_{turbine}$  : rated power of the electrolyzer and the fuel cell turbine.

$I_r$ : direct radiation (J/m<sup>2</sup>)

$I_d$  : diffuse radiation (J/m<sup>2</sup>)

$\rho_s$  : Reflection coefficient of the ground

$I$  : Global horizontal radiation on a horizontal plane

$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$  : a geometric factor

$E_k$ : energy produced during the hour k of the day considered (J)

$S_{PV}$  : total area of the solar panels installed (m<sup>2</sup>)

$\eta_{mppt}$  : average efficiency of the installation

$\eta_{elec}$  : loss in the PV system

EMR= REM : Energetic Macroscopic Representation

EMS : Energy Management Strategies

FLC : Fuzzy Logic Controller

SoC : State of Charge

SC : Super Capacitor

SoC-bat : State of charge of the batteries

SoC-SCs : States of Charge of the SuperCapacitors

ECS : Eau chaude sanitaire

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Best annual solar production for the 5 places under study .....	30
Tableau 2.2 : Angle between best slope and latitude of the location .....	30
Tableau 2.3 : Annual consumption for heating for the 5 locations under study .....	33
Tableau 2.4 : Range of variation and price of the parameters used for the sizing procedure ...	33
Tableau 2.5 : Repetition of the optimization routine.....	37
Tableau 2.6 : Compared sizing results for different locations using GA. ....	38
Tableau 2.7 : Compared result for two different configurations of the arrays .....	42
Tableau 3.1 : Main features of each subsystem.....	50
Tableau 3.2 : EMR and graphical representation .....	74
Tableau 4.1 : Arguments de vente comparés de 6 technologies proposant des solutions d'autonomie .....	83

# LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : présentation du facteur géométrique $R_b$ .....	5
Figure 1.2 : Schéma bloc d'une maison autonome .....	10
Figure 2.1 Schematic diagram of the stand-alone hybrid system .....	19
Figure 2.2 : logical block of control states for EMS .....	21
Figure 2.3 : Two-noded (or R3C2 model) thermal system representation of the building .....	25
Figure 2.4 : Real and simplified efficiency of the electrolyzer .....	27
Figure 2.5 : Annual PV production as a function of $\beta$ and $\gamma$ at Montreal .....	29
Figure 2.6 : Solar production throughout the year for the case of Montreal in optimal position .....	31
Figure 2.7 : Thermal demand throughout the year in Montreal .....	32
Figure 2.8 : Profile of normalized French residence .....	34
Figure 2.9 : Results of the sizing using GA of the stand-alone system implanted in Montreal .....	35
Figure 2.10 : : SoC of the batteries and the tanks throughout the year .....	36
Figure 2.11 : LPSP and Total installation cost throughout the generation (Montreal) .....	37
Figure 2.12 : Visualization of the total cost breakdown for each place .....	39
Figure 2.13 : Solar production for one array in Montreal tilted towards south at: 70° (right) and 30° (left) .....	41
Figure 3.1 : Schematic diagram of the stand-alone hybrid system .....	49
Figure 3.2 : EMR Full dynamic and quasi-static of the whole battery system .....	51
Figure 3.3 : Look up tables generated for the battery system .....	52
Figure 3.4 : Validation of the simplified model for the whole battery system .....	53
Figure 3.5 : Look up table of the output current produce by the PV system .....	53
Figure 3.6 : Validation of the simplified model for the whole PV system .....	54
Figure 3.7 : EMR full dynamic model of the electrolyser .....	55
Figure 3.8 : EMR Full dynamic and quasi-static model of the electrolyzer and its surrounding .....	55
Figure 3.9 : Look-up tables generated for the electrolyzer and its surrounding .....	56
Figure 3.10 : Validation of the simplified modelling of the electrolyzer .....	57
Figure 3.11 : EMR full dynamic and quasi-static model of a PEM Fuel Cell and its direct surrounding .....	57
Figure 3.12 : Look up tables generated for the PEM Fuel Cell system .....	58
Figure 3.13 : Validation of the simplified Fuel Cell model .....	59
Figure 3.14 : EMR models of the supercapacitor system .....	59
Figure 3.15 : Global EMR of the whole Autonomous Building .....	60
Figure 3.16 : Flow chart for Upper Strategy Layer of rule-based EMS .....	62
Figure 3.17 : Overview of the rule-based EMS scheme .....	63



Figure 3.18 : Overview of the improved EMS using FLC .....	64
Figure 3.19 : Look up Table generated for the dynamic Power limitation of the electrolyser..	65
Figure 3.20 : 3D FLC map of dynamic power limitation for the PEMFC .....	66
Figure 3.21 : : 3D FLC map of SC contribution.....	68
Figure 3.22 : Main Power Flow evolution using the two proposed EMS .....	69
Figure 3.23 : SoC evolution of the batteries and $H_2$ -tanks .....	70
Figure 3.24 : Comparison of the external supply power needed. ....	71
Figure 3.25 : Evolution of the SoC of the SCs for the two EMS .....	72



# INTRODUCTION

Ce projet s'inscrit dans un contexte planétaire particulier : le fait que l'homme ait un impact sur son environnement est de moins en moins questionné et le réchauffement climatique nous pousse à diminuer nos émissions de gaz à effet de serre. Combiné à la baisse de rentabilité des grands producteurs d'énergie fossile et au marché historiquement bas des énergies renouvelables, la tendance actuelle est d'optimiser au maximum l'utilisation des hydrocarbures dans notre mix énergétique. Par ailleurs, le concept de développement durable s'immisce au cœur des sociétés, et suscite la volonté de construire un nouveau modèle de développement, plus intelligent, mieux organisé, plus égalitaire et surtout respectueux de l'environnement.

A ce titre, une véritable révolution industrielle est en marche dans le domaine du bâtiment, qui, rappelons-le, occupe une place de tout premier choix dans la facture énergétique de nombreux pays. A titre illustratif, cela représente 44% de la consommation énergétique finale française en 2013 tout secteur confondu.[1] Heureusement, ce contexte mondial, qui promeut la réduction des dépenses énergétiques du bâtiment – à l'instar, par exemple, des nouvelles normes européennes RT2012 [2] ou prochainement RT2020 – amène des progrès spectaculaires notamment dans **l'isolation thermique**. Par exemple, les besoins des bâtiments à consommation énergétique nette zéro au Canada visent à être réduits par 4 par rapport aux bâtiments conventionnels, et la génération photovoltaïque moyenne annuelle couvre ces besoins.[3]. Dans le même temps, le marché du photovoltaïque est en pleine explosion depuis les années 2010, amenant une **baisse** très importante et continue du **coût d'installation du watt photovoltaïque**. Ce dernier est ainsi passé de 14€/W en 1975, à environ 0.5€/W en 2014, alors que le prix du module lui-même se négocie aujourd'hui autour de 2€ par watt-crête installé (Wc). Cela conduit au coût total d'un système autour de 2.3€/Wc, soit un kWh photovoltaïque produit autour de 0.3€ en 2016. (en supposant grossièrement une production annuelle de 0.9kWh par Wc installé) soit le même ordre de grandeur que le réseau actuel français en période de pointe. [4]

Si les tendances actuelles se confirment, il sera possible, dans un avenir très proche, de concevoir un bâtiment à consommation énergétique nette zéro pour un coût quasiment équivalent à celui d'un bâtiment « classique ». Un nouveau défi émerge alors : **l'autonomie énergétique complète**, au sens où la maison pourrait satisfaire elle-même ses besoins électriques et thermiques. En effet, si, en moyenne sur une année, le bâtiment produit autant d'énergie qu'il n'en consomme, celui-ci ne pourrait pourtant pas être déconnecté du réseau électrique local : l'intermittence photovoltaïque amène des courbes de production en grande partie dissociées des courbes de consommation, à la fois à l'échelle journalière, mais également à l'échelle

saisonnaire. Cette question du stockage de l'énergie permettant une disponibilité en tout temps est le problème principal qui doit être résolu dans le cas de l'autonomie de sites isolés. A ce titre, le LN2 mène actuellement des recherches au 3IT de l'Université de Sherbrooke, sous la direction de Vincent Aimez, pour répondre à cette problématique. Cette présente recherche est réalisée dans cette perspective.

La réalisation de ce projet de maîtrise est originale de par sa transversalité. En effet, ces travaux couvrent à la fois un dimensionnement général optimal de l'installation, le développement de stratégies de gestion d'énergie utilisables en temps réel s'appuyant sur un modèle électrique précis, ainsi que l'étude des enjeux éthiques associés à l'implantation réelle d'une telle installation.

Un état de l'art général montre que de nouveaux aspects sont considérés et mis en avant pour chacun des axes développés : le dimensionnement optimal qui prend en compte simultanément le besoin électrique et thermique et considère la ressource solaire locale n'a jamais été réalisé. Un modèle électrique dynamique complet d'un bâtiment autonome structuré en utilisant la REM n'a jamais été simulé ou servi de support pour développer des stratégies de gestion d'énergie avancées. Enfin, l'approche par les « usages responsables » telle que présentée en chapitre 5 est nouvelle et permet de mettre en perspective les différents résultats techniques qui seront présentés.

Le présent mémoire est structuré de la façon suivante : le premier chapitre constitue un état de l'art général sur les différents aspects à considérer. Le chapitre suivant présente un dimensionnement optimal du bâtiment autonome qui prend en compte le climat. Par la suite, le développement d'un modèle électrique complet du bâtiment et de stratégies de gestion d'énergie associées est présenté au chapitre 4. Enfin, le chapitre 5 sensibilise aux enjeux et défis sociaux et éthiques associés à l'implantation réelle d'un bâtiment autonome.

# CHAPITRE 1

## ETAT DE L'ART

### 1.1 Introduction

Pris séparément, les éléments nécessaires à développer pour obtenir les résultats escomptés sont très documentés dans la littérature : les modèles thermiques, de production photovoltaïque ou de dimensionnement optimal sont largement documentés. De même, les modèles dynamiques des différents éléments qui constituent le bâtiment autonome sont pour la plupart bien connus. Cependant, l'association des différents modèles pour prendre en compte le climat dans le dimensionnement du bâtiment, ou la simplification d'un modèle électrique complet de bâtiment autonome pour développer et comparer des stratégies de gestion d'énergie n'a pas, selon l'état des recherches actuelles, encore été réalisée. Ainsi, il est présenté ici l'état de l'art de ces dits éléments, le travail de recherche consiste alors à en faire la synthèse, à la fois pour le dimensionnement, mais aussi pour la simulation dynamique du bâtiment. Par ailleurs, la prise en compte des enjeux et défis éthiques liés à l'implantation réelle d'un bâtiment constitue aussi une nouveauté.

### 1.2 Estimation de la ressource solaire disponible

Un aspect important réside dans la **modélisation assez fine de la production photovoltaïque** à espérer au cours du temps, en fonction du type de panneaux utilisés, du lieu géographique où ils sont implantés, et de l'orientation même de ces derniers. Un ouvrage extrêmement complet est alors utilisé pour effectuer cette modélisation : *Solar Engineering of Thermal Process* [5]. Par ailleurs, une étude comparative des résultats obtenus entre l'application des modèles présentés dans le livre et les résultats des logiciels commerciaux d'estimation de la production photovoltaïque a aussi été effectuée de façon détaillée dans ce document : [6].

#### 1.2.1 Détermination de l'irradiance totale

Pour pouvoir estimer la production électrique annuelle, une première étape consiste à établir l'irradiance solaire totale au cours du temps que recevront nos panneaux solaires photovoltaïques, en fonction du lieu où ils sont implantés, ainsi que de leur orientation (azimut et inclinaison). Pour ce faire, il est nécessaire d'avoir des données météorologiques du lieu où est bâtie la maison. Celles-ci peuvent être obtenues gratuitement sur internet. Ici, il sera utilisé les données disponibles en accès libre sur le site EnergiePlus [7]. Les données fournies sont

issues de 20 sources différentes. Il s'agit en règle générale de données météorologiques horaires fournies pour un lieu donné sur une année complète. Ces données annuelles sont en réalité une moyenne des données obtenues sur plusieurs années choisies comme représentatives du climat moyen du lieu considéré. Par exemple, la plupart des données européennes sont au format IWECC. Ce format désigne une certaine manière de définir une année « typique », en l'occurrence, comme étant une moyenne sur 18 ans (période 1982-1999). Ces données fournissent l'irradiance directe, diffuse et globale horizontale à un pas de temps horaire sur toute l'année. Un premier travail de traitement des données est alors nécessaire.

En effet, il est considéré un positionnement fixe des panneaux solaires, à un certain lieu et suivant une certaine direction. Il faut ainsi passer de la ressource solaire horizontale à celle effective sur le plan des panneaux. Les formules mathématiques déterminant l'angle d'incidence des rayons solaires, la déclinaison solaire ou encore l'heure solaire de lever et de coucher du soleil, bien que très complexes, sont aujourd'hui admises et relativement facilement accessibles dans la littérature. (cf. [8] et [5]).

Un certain nombre de paramètres doivent cependant être définis :

- La latitude  $\varphi$  : localisation angulaire du nord au sud de l'équateur ( $-90 \leq \varphi \leq 90$ )
- La déclinaison solaire  $\delta$  : position angulaire du soleil entre la droite « Terre-Soleil » et le plan équatorial dans le ciel au midi solaire, c'est-à-dire, quand le soleil est au méridien local ( $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ , positif entre l'équinoxe de mars et la suivante en septembre).
- L'angle d'azimut de la surface  $\gamma$  : décalage d'orientation de la surface par rapport au méridien local. ( $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$  ;  $-90^\circ$  = plein Est,  $90^\circ$  = plein ouest)
- La pente  $\beta$  : inclinaison du plan considéré par rapport à l'horizontale. ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$  ;  $\beta > 90^\circ \Rightarrow$  surface « regardant » le sol)
- L'angle horaire  $\omega$  : le déplacement angulaire du soleil d'est en ouest dû à la rotation angulaire de la Terre sur son axe de  $15^\circ$  par heure. (négatif avant le midi solaire, positif après).
- L'angle d'incidence  $\theta$  des rayons solaires sur la surface considérée
- L'angle de zénith  $\theta_z$  : angle d'incidence des rayons solaires sur une surface horizontale au midi solaire

Le facteur géométrique  $R_b$  est un objet mathématique important, qui désigne le ratio entre les rayons solaires sur la surface inclinée par rapport à ces mêmes rayons sur la surface horizontale. En effet, ce facteur géométrique existe et affecte l'irradiance solaire reçue. Voici une illustration, présentée au premier chapitre du livre [5], qui illustre ces propos :

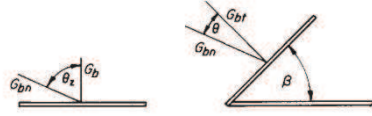


Figure 1.1 : présentation du facteur géométrique  $R_b$

On obtient ainsi :  $R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$ . Ce coefficient constitue un élément clef dans tous les modèles existants permettant d'estimer la ressource solaire sur un plan incliné à partir des données horizontales.

Deux modèles sont utilisés dans ces travaux, pour estimer la ressource solaire sur la surface inclinée : un modèle de ciel isotropique, et un modèle anisotropique. La problématique est ainsi d'estimer, à partir des données horizontales, la part de l'irradiance qui est dite « directe » et venant spécifiquement du soleil, de la part dite diffuse et n'ayant pas d'origine géographique définie. En effet, le traitement à appliquer à ces composantes pour en déduire ce qui est disponible sur le plan incliné est différent : la part directe reçue est fonction linéaire de  $R_b$ , tandis que la part diffuse est pondérée par un facteur de forme. Enfin, on doit prendre en compte la part réfléchiée par le sol. Ainsi, l'irradiance totale reçue sur la surface peut être définie, en utilisant une représentation isotropique du ciel, de la façon suivante :

$$I_T = I_r R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + I \rho_s \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (1.1)$$

Où :

- $I_r$  : radiation directe ( $\text{J/m}^2$ )
- $I_d$  : radiation diffuse ( $\text{J/m}^2$ )
- $\rho_s$  : coefficient de réflexion du sol
- $I$  : irradiance totale sur la surface horizontale.

Le modèle anisotropique, d'une même complexité, s'obtient en affinant le traitement effectué sur la part diffuse du rayonnement solaire. Ce modèle décompose ainsi la partie diffuse comme la somme d'une partie isotropique et d'une partie circumsolaire, dont la proportion dépend d'un indice d'anisotropie.

Afin de s'assurer que les données météorologiques sont correctement lues, et qu'elles présentent une certaine cohérence, il est également intéressant de reconstruire l'estimation de l'irradiance globale horizontale à partir des modèles présentés et des données que l'on a sur l'irradiance directe et diffuse, et de la comparer à celle fournie par le fichier météo. Cela permet à la fois de

valider la bonne implantation des modèles et la pertinence des données météo utilisées. (cf. [9]).

A partir des fichiers de données météorologiques, et des modèles présentés ci-dessus, il est ainsi possible d'obtenir la ressource solaire disponible sur la surface des panneaux solaires. On obtient ainsi l'irradiance totale horaire sur toute l'année, disponible par les panneaux solaires.

### 1.2.2 Détermination de la production électrique

Une fois les données d'ensoleillement disponibles, il faut estimer la production photovoltaïque résultante. Pour cela, une modélisation statique est utilisée, permettant de calculer, à un pas de temps horaire, cette production. Comme explicité dans l'ouvrage [5], pour une heure  $k$  du jour considéré, l'énergie solaire produite peut être estimée par la relation :

$$E_k = S_{PV} * I_T * \eta_{mppt} * \eta_{elec} \quad (1.2)$$

Où :

- $E_k$  : énergie produite au cours de l'heure  $k$  du jour considéré (J ou Wh)
- $S_{PV}$  : surface totale de modules photovoltaïques installés ( $m^2$ )
- $I_T$  : irradiation totale sur le plan des modules ( $J/m^2$  ou  $Wh/m^2$ )
- $\eta_{mppt}$  : efficacité de l'installation équipée d'un suivi de puissance maximale (%)
- $\eta_{elec}$  : prise en compte des diverses pertes (pertes par effet joule et poussière notamment)

Cette façon de calculer approximativement la ressource solaire disponible annuellement, en fonction du lieu, de données météo, et des différentes caractéristiques de l'installation et des panneaux constitue la base communément admise, utilisée notamment par la majorité des logiciels d'estimation de la production photovoltaïque. En effet, une comparaison de la production photovoltaïque obtenue via les principaux logiciels commerciaux avec le modèle général présenté ci-dessus a été réalisé (cf. [6]) et démontre, à système égal, des résultats quasiment identiques.

## 1.3 Estimation du besoin énergétique du bâtiment

Pour simuler les flux énergétiques du bâtiment et de ses utilisateurs, il convient d'estimer la consommation thermique et électrique de ce dernier. Cette étape est relativement complexe, et dépend de nombreux paramètres difficilement généralisables.



Une approche possible consiste à séparer la part de besoin thermique, de celle correspondant aux besoins quotidiens électriques (hors chauffage) des occupants, en utilisant une consommation énergétique totale annuelle du bâtiment comme paramètre d'entrée. Ainsi, la démarche utilisée peut être résumée comme suit : en premier lieu, on détermine la consommation énergétique annuelle totale du bâtiment et de ses utilisateurs, en exploitant certaines consommations de référence pour respecter les réglementations actuelles par exemple. Ensuite, on utilise un modèle simplifié permettant d'estimer les besoins thermiques du bâtiment au cours du temps. On utilise des données en libre accès sur la consommation électrique au cours du temps du secteur tertiaire, pour estimer le besoin électrique.

### 1.3.1 Estimation de la consommation énergétique d'un bâtiment

Il convient de correctement **estimer la consommation énergétique d'un bâtiment**, en fonction de ses caractéristiques générales et des données météorologiques du lieu sélectionné. Rappelons que l'approche que nous souhaitons proposer dans ces travaux se veut être générale, et doit permettre de déterminer a priori la consommation supposée du bâtiment au cours du temps. Il ne s'agit donc pas de reconstruire un modèle de bâtiment, à partir de sa courbe de charge par exemple (voir [10] [11]), mais d'estimer quel peut être un profil typique de consommation, en fonction de caractéristiques très générales, et des données météo du lieu considéré.

Pour ce faire, une modélisation dynamique est effectuée (voir [12]), en reprenant celle proposée dans le bâtiment [13] : on représente la maison par deux « nœuds thermiques », afin de simuler le comportement moyen de l'air dans la maison, et des murs qui constituent une certaine inertie thermique. La démarche consiste alors à récupérer des fichiers météo horaires, fournissant notamment la température extérieure au cours du temps pour le lieu donné. Il est évident que ces données sont fictives, et ne seront pas mesurées en pratique, mais elles permettent d'avoir les tendances et les évolutions générales des profils au cours de l'année. En parallèle, il est nécessaire de déterminer l'apport d'énergie solaire thermique que reçoit le bâtiment, car cette part n'est généralement pas négligeable.

Ainsi, le modèle analytique utilisé représente un bilan énergétique général à chaque nœud considéré. Soit le point A représentant l'air dans la pièce, B la structure du bâtiment, et C l'air à l'extérieur du bâtiment, le bilan thermique au point A s'écrit :

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{(-G_{AB} + G_{AC})}{C_A} * T_A + \frac{G_{AB}}{C_A} T_B + \frac{P_{chauffage}}{C_A} + \frac{G_{AC}}{C_A} * T_C \quad (1.3)$$

Avec :

- $T_A, T_B$  et  $T_C$  : températures de l'air intérieur, des murs et de l'air extérieur (K)
- $G_{AB}$  et  $G_{AC}$  : respectivement, la conductance équivalente entre l'air intérieur et les murs, et entre l'air intérieur et l'air extérieur. (W/K)

- $C_A$  : capacité thermique, ou chaleur spécifique, de l'air (W/K)

A noter que le renouvellement de l'air de la maison est inclus dans le terme  $G_{AC}$  de conductance entre l'air intérieur et extérieur de la pièce.

L'équation 1.3 est reprise de façon analogue pour effectuer le même bilan thermique au mur. On aboutit finalement au système matriciel suivant :

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \bar{A} * \vec{T} + \bar{B} * \vec{U} \quad (1.4)$$

Avec :

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} T_A \\ T_B \end{pmatrix}; \bar{A} = \begin{pmatrix} -\frac{G_{AB}+G_{AC}}{C_A} & \frac{G_{AB}}{C_A} \\ \frac{G_{AB}}{C_B} & -\frac{G_{AB}+G_{BC}}{C_B} \end{pmatrix}; \bar{B} = \begin{pmatrix} 1/C_A & 0 & G_{AC}/C_A \\ 0 & 1/C_B & G_{BC}/C_B \end{pmatrix}$$

$$\text{et } \vec{U} = \begin{pmatrix} P_{chauffage/A} \\ P_{chauffage/B} \\ T_C \end{pmatrix}$$

Les données météo servent ainsi d'entrée à ce modèle au travers du terme  $T_C$ , correspondant à la température extérieure, ainsi que pour calculer le chauffage solaire apporté au mur et à l'air intérieur à travers les termes  $P_{chauffage/A}$  et  $P_{chauffage/B}$ . [13]

Cette modélisation, qui peut paraître simpliste, a pourtant l'avantage de présenter une certaine fiabilité et de fournir des estimations relativement correctes, comme le montrent certaines études réalisées : dans l'article [14], le modèle présenté ici est utilisé pour simuler le comportement thermique d'une école instrumentée. De nombreux résultats sont alors présentés et montrent une certaine fiabilité du modèle, à condition que les paramètres d'entrée soient correctement initialisés. De même, un modèle RC analogue au modèle matriciel ci-dessus est étudié et comparé expérimentalement dans l'article [15].

### 1.3.2 Construction de l'estimation de la consommation électrique de la maison

Une difficulté importante dans la construction d'un modèle général de gestion énergétique d'une maison autonome réside dans la détermination d'un profil de consommation électrique du bâtiment. En effet, il est aujourd'hui possible -avec plus ou moins de finesse- de déterminer mathématiquement la production photovoltaïque, la consommation thermique du bâtiment, ou même le comportement physique de systèmes tels que les convertisseurs, les batteries, électrolyseurs ou tout autre dispositif électrique. De plus, même si le climat n'est évidemment pas prévisible, et que les fichiers de données météo ne nous permettent pas de prédire pour une année donnée quels seront l'ensoleillement et la température en fonction du temps, ces données,

moyennées sur une année, représentent une estimation assez fiable de la ressource totale d'énergie disponible sur l'année. En revanche, la modélisation de la consommation électrique du bâtiment amène un sujet de réflexion plus général.

### **1.3.2.1 Un axe éthique important**

Le profil de consommation électrique d'une maison dépend dans une large mesure du comportement de ses occupants, qui est imprévisible a priori. Dans le cadre d'un bâtiment autonome, il pourrait être pourtant avantageux de posséder cette information, même approximative, pour pouvoir adapter la stratégie de gestion de l'énergie, et améliorer les performances du bâtiment. Cela ouvre un axe de réflexion beaucoup plus général : les bâtiments autonomes devraient-ils s'autoréguler, en utilisant une gestion intelligente des systèmes utilisés par l'utilisateur (gestion automatique du chauffage, de l'éclairage, du démarrage d'un réfrigérateur, etc.) pour adapter la courbe de consommation électrique et optimiser les performances du bâtiment ? Ou doit-on au contraire ne pas intervenir sur les systèmes en interaction directe avec les habitants, et garantir, peu importe le prix à payer, un fonctionnement en autonomie du bâtiment ?

La problématique de la gestion intelligente de l'énergie d'une maison autonome demande ainsi à s'interroger sur l'aspect éthique des objets connectés, regroupé dans l'ensemble plus général de l'internet des objets (voir notamment l'article [16]).

Les systèmes autonomes connaissent un essor spectaculaire depuis la dernière décennie, alors que les discussions d'ordre éthique peinent à émerger. Ils sont souvent associés à des systèmes dits « d'intelligence artificielle », sur lesquels la communauté scientifique ouvre la discussion éthique (cf. [17], [18]).

Dans notre étude, cet aspect intervient dans la modélisation du besoin électrique du bâtiment : il serait possible d'inclure une part « modulable » de besoin (en pourcentage du besoin énergétique total annuel, par exemple), et une part fixe non modifiable. On pourrait montrer l'intérêt de modifier cette courbe de charge sur les performances énergétiques de la maison autonome.

Quelque soit la démarche retenue, il reste à construire un profil de charge, représentatif du comportement moyen des habitants dans le secteur résidentiel.

### **1.3.2.2 Profil de charge électrique moyen**

Comme discuté précédemment, il n'est pas possible de prédire la charge électrique au cours du temps spécifique à un ménage donné, mais seulement un profil typique que l'on considérera, tout comme le profil de production photovoltaïque, comme représentatif du comportement moyen. Pour construire ce profil, on utilise les données de consommation électrique disponibles

en accès libre auprès de l'entreprise ENEDIS. Un document très détaillé ([19]) précise comment construire les profils à partir des données fournies.

Le profilage permet ainsi de prédire la consommation d'une maison, à un pas de temps demi-horaire, sur toute l'année. Il est représentatif du comportement moyen d'une maison individuelle en France, mais s'appuie sur une consommation moyenne prise à une température extérieure moyennée sur plusieurs années. ENEDIS et ERDF adaptent ensuite ces profils en fonction des températures réelles mesurées sur le territoire pour gérer le réseau électrique français, mais cela ne correspond alors plus à l'approche que nous proposons. Aussi, nous n'utiliserons le profil moyen qu'à titre de référence.

## 1.4 Modélisation électrique de la maison autonome

### 1.4.1 Présentation schématique d'un bâtiment autonome

Dans nos présents travaux, nous définissons de façon technique un bâtiment autonome comme un bâtiment n'étant connecté à aucun réseau électrique ou sanitaire. Il produit via une source d'énergie renouvelable (en l'occurrence des panneaux photovoltaïques) toute l'énergie dont il a besoin pour son fonctionnement, ce qui inclut les besoins électriques et thermiques de ces habitants. De par la nature intermittente des énergies renouvelables, un système de gestion efficace de l'énergie et un module de stockage sont nécessaires pour assurer en tout temps la disponibilité de l'énergie. On peut représenter schématiquement un bâtiment autonome de la façon suivante :

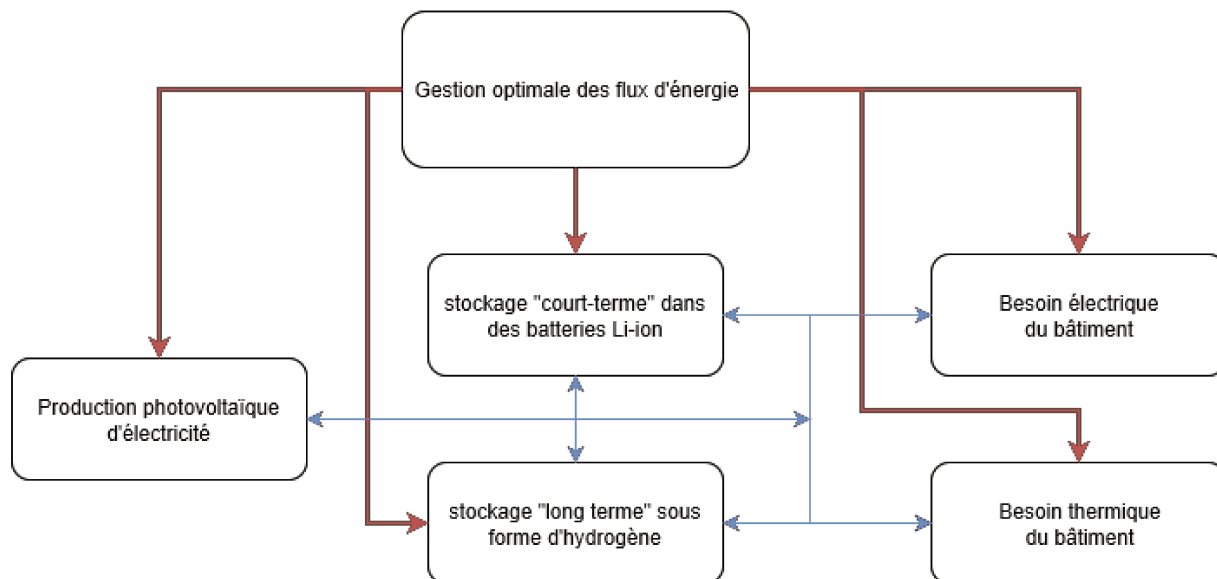


Figure 1.2 : Schéma bloc d'une maison autonome

Les flèches rouges représentent un signal de commande tandis que les flèches bleues illustrent les flux d'énergie qui opèrent entre les différents sous-systèmes. A noter que l'on a présentement dissocié un système de stockage dit « court -terme » (typiquement à l'échelle d'une journée) que sont des batteries électrochimiques, d'un système de stockage à long terme qu'est le réservoir d'hydrogène (échelle de plusieurs semaines). Leur avantages et inconvénients complémentaires peuvent permettre de gérer plus efficacement les flux d'énergie tout en minimisant le coût total de l'installation. Enfin, le système de gestion d'énergie doit gérer les flux énergétiques de manière à répondre en permanence à la demande thermique et électrique du bâtiment.

### 1.4.2 Présentation de la Représentation Energétique Macroscopique

Il convient de structurer le modèle électrique qui sera utiliser pour étudier différentes stratégies de gestion d'énergie et obtenir ainsi un profil de résultats comparés. Ainsi, la **Représentation Energétique Macroscopique** (REM) semble constituer un excellent candidat pour être utilisé comme outil de structuration du modèle électrique. Elle permet de modéliser un système de façon physique, en respectant le principe de causalité entre les différents éléments. Initialement, ce formalisme a été développé pour aider les ingénieurs à obtenir rapidement des lois de commande pour contrôler des systèmes complexes, mais il est très facile d'étendre cet objectif initial pour utiliser la REM comme un outil visant à simuler un système multiphysique complexe, et permettre ainsi de tester différentes stratégies de gestion de l'énergie. La REM est aujourd'hui très largement documentée, et un article reprend d'ailleurs de façon particulièrement efficace les principes de bases associées à ce formalisme (cf. [20]).

Ainsi, structurer un modèle en utilisant la REM permet dans notre cas d'avoir une représentation visuelle et par bloc du système électrique complet d'une maison. On dissocie des éléments dits sources, qui représentent l'environnement du système, des éléments dits d'accumulation, qui représentent des éléments de stockage d'énergie, comme une inductance ou un condensateur. On retrouve également des éléments de conversion, qui, par définition convertissent l'énergie d'une forme à une autre, comme un moteur ou un électrolyseur, et enfin des éléments de couplage qui représentent un nœud énergétique entre plusieurs chaînes de conversion d'énergie (par exemple, lorsqu'une batterie et une super capacité sont branchées en parallèle sur un même bus continu).

Dans notre cas, un modèle général doit s'appuyer sur une modélisation REM des différents sous-systèmes constitutifs de notre système. Ainsi, il est nécessaire de modéliser avec le formalisme REM le sous-système « panneaux photovoltaïques », mais aussi le sous-système « électrolyseur » (incluant notamment le réservoir d'hydrogène et le compresseur) ou encore le bloc batterie et le système de redistribution d'énergie (hydrogène en électricité et chaleur). La

REM étant un support visuel à la modélisation, elle présente la particularité de permettre une modélisation aussi fine que l'on veut des différents systèmes : on peut simplement modéliser les équations « principales » et de base du système, en reprenant alors des modèles à l'ordre 1 ou 2 de chaque système, et en effectuant des hypothèses simplificatrices sur le fonctionnement moyen de l'élément (c'est le choix que nous retenons). Cependant, il serait aussi possible de modéliser la moindre interaction énergétique qui opère dans le système, et aboutir à des systèmes, certes extrêmement réalistes, mais d'une complexité telle qu'il sera alors impossible avec les performances des systèmes informatiques actuelles d'effectuer une simulation en un temps raisonnable. Par exemple, un modèle de bâtiment a en partie déjà été effectué et structuré en utilisant ce formalisme, mais illustre cette sur-complexité qui fait défaut quand on souhaite pouvoir simuler le système (voir notamment le schéma REM complet page 111 de la thèse de K. S. Agbli, cf. [21]). Dans cette thèse, les simulations réalisées sont alors limitées à de simples cas particuliers de modes de fonctionnement.

## 1.5 Stratégie de gestion d'énergie

Une fois le travail de modélisation réalisé, il est nécessaire de construire **des stratégies de gestion d'énergie**, pour pouvoir effectuer une simulation dynamique du fonctionnement de la maison autonome. En effet, à chaque instant, l'installation complète (système photovoltaïque, batterie, électrolyseur, moteur à hydrogène, etc.) doit répondre à la demande de l'utilisateur. Cela suppose une gestion efficace des flux d'énergie au sein du système, afin d'assurer un réseau électrique local équivalent à celui proposé par les réseaux électriques nationaux. Ainsi, le cas de la maison autonome soulève deux contraintes à respecter dans la gestion de l'énergie : il faut en permanence avoir stocké suffisamment d'énergie pour pouvoir répondre à la demande de la maison et de ses utilisateurs mais il faut également être en mesure de répondre aux pics de puissance (pourtant peu énergivores) du bâtiment, qui pourrait provoquer la coupure du réseau, par chute de la tension.

De nombreux travaux sont aujourd'hui présents dans la littérature et proposent différentes stratégies de gestion d'énergie pour des maisons autonomes. Une façon élémentaire et efficace de répondre à cette problématique, consiste à effectuer une stratégie constituée de **blocs de commande utilisant des états logiques** (cf. [22], [23], [24]). Cela permet au système de fonctionner dans un cadre déterminé. On peut, par exemple, ne demander de la puissance à la batterie que si elle est dans sa zone de fonctionnement nominale. Différentes stratégies à blocs de commande logique sont étudiées et comparées dans la littérature. Ainsi, l'article [25] compare trois stratégies différentes en effectuant une simulation d'un bâtiment autonome utilisant la ressource solaire photovoltaïque et éolienne, et en effectuant un stockage d'énergie à long terme utilisant le vecteur hydrogène. Cette simulation est réalisée sur environ 4 mois et illustre, pour un système donné, l'influence importante de la stratégie utilisée.

Une autre façon de gérer efficacement l'énergie consiste à utiliser une **structure de commande à logique floue**. La logique floue est, d'une certaine manière, une généralisation de la logique booléenne (vrai/faux, oui/non) présentée ci-dessus. Le but est de doter le système de gestion d'énergie d'une analyse qui se rapproche de celle de l'être humain confronté à une situation donnée. Une telle structure de gestion d'énergie est présentée et appliquée à un système analogue à celui présenté précédemment, dans cet article [26].

Par ailleurs, il peut être bénéfique d'incorporer des méthodes utilisées actuellement dans le secteur de l'automobile pour le développement des véhicules électriques (=VE) au système de gestion d'énergie. La problématique est en effet identique dans le cas du VE qui peut combiner batterie, pile à combustible ou super capacité pour satisfaire le besoin énergétique (voir notamment les articles suivants ; [27], [28]). Dans ces articles, une approche différente y est présentée, utilisant une stratégie **méta-heuristique**. Le principal avantage de l'utilisation de la méta-heuristique réside dans la capacité du système de gestion à trouver une solution plus ou moins optimale dans un temps relativement court. L'utilisation de cette méthode est nécessaire quand on souhaite trouver une solution idéale à un problème donné. Dans le cas de la maison autonome, cela peut permettre d'optimiser la stratégie de gestion plus globale, et de la rendre plus efficace pour une application en temps réel.

## 1.6 Problématique et objectifs du projet

Comme expliqué précédemment, on devrait constater au cours de ces prochaines années l'émergence de bâtiments « Net Zéro » (qui produisent en moyenne autant d'énergie qu'ils n'en consomment) à un coût comparable aux bâtiments standards. Appliquée au contexte particulier des bâtiments autonomes, déconnectés de tout réseau, la question du stockage de l'énergie excédentaire se pose alors, puisque, en période de production photovoltaïque, cette dernière dépasse la grande majorité du temps la consommation du bâtiment. La question fondamentale à laquelle ces travaux chercheront à répondre est la suivante :

**Comment gérer les flux énergétiques pour un bâtiment autonome et quelles sont les caractéristiques générales des éléments de stockage nécessaires pour satisfaire cette autonomie ?**

## 1.7 Approche de recherche

Principalement, le projet de maîtrise vise à effectuer **une étude complète et pluridisciplinaire d'une maison autonome**, en incluant une modélisation de la production photovoltaïque, des besoins thermiques et électriques, et enfin une simulation du bâtiment sur une année. Une partie

du travail consiste à effectuer une étude comparée en faisant varier certains paramètres, notamment la localisation et les besoins thermiques et électriques. Cette simulation inclut l'aspect économique, et permet de comparer les besoins nécessaires (stockage, etc.) en fonction des paramètres modulés. Par ailleurs, un modèle électrique est développé et pourra ultérieurement servir de support pour le développement de nouvelles stratégies de gestion d'énergie (plus avancées encore que celles présentées dans ces travaux).

Cette étude ne cherche pas à représenter dans le détail les différents systèmes électriques du bâtiment, car le travail serait trop conséquent, et ne permettrait pas de prendre du recul et de simuler complètement le bâtiment. Ainsi, on va chercher, autant que possible, à utiliser les modèles les plus communément admis, pour **représenter le comportement moyen de chaque système**. De même, les modèles de production photovoltaïque et de consommation thermique du bâtiment se voudront simples, à la fois parce que, par définition, il n'est pas possible de prédire précisément ces données qui sont tributaires du climat, et aussi parce que l'objectif sous-jacent est de mettre en valeur des tendances générales. Ainsi, on souhaite représenter le comportement moyen du bâtiment, et pouvoir **adapter aisément la simulation d'un lieu à un autre**.

Un travail est également mené pour simplifier les modèles électriques REM présentés, afin de réduire le temps de calcul nécessaire en vue de simuler le bâtiment sur plusieurs jours, tout en préservant une certaine finesse d'un point de vue énergétique. La solution retenue ici est de les simuler séparément et de construire des tables de conversion (ou « *look-up table* »), fournissant de façon générale le lien entre les paramètres d'entrée (tension, courant), et les paramètres de sortie (rendement du système, consommation d'énergie).

Enfin, le problème de l'autonomie complète nécessite de prendre en compte les usages des utilisateurs du bâtiment. La notion d'autonomie n'a réellement de sens qu'à travers l'utilisation que pourront faire les occupants du bâtiment. De plus, les bâtiments autonomes sont souvent associés à des bâtiments écologiques, responsables et renouvelables. Le dernier chapitre sensibilisera cependant aux enjeux éthiques et illustrera dans l'étude d'un cas concret au Canada les dilemmes d'ordre éthiques et environnementaux qui se posent.

## 1.8 Conclusion du chapitre

Ce chapitre a ainsi présenté les différents outils qui seront utilisés dans la suite des travaux : un état de l'art sur la façon de modéliser la ressource solaire disponible, la modélisation thermique et électrique d'un bâtiment, ainsi que le dimensionnement et les différentes stratégies possibles de gestion d'énergie a été présenté. Les enjeux éthiques ont été abordés, mais seront plus largement développés dans la suite de ce document.



# CHAPITRE 2

## DIMENSIONNEMENT DU BATIMENT AUTONOME

**Titre original :** Climate Impact on The Optimal Sizing of a Stand-Alone PV/Hydrogen/Battery-Based Hybrid Building

**Auteurs et affiliations :**

**Voisin Jules**, Département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Darnon Maxime**, Ph.D. Professeur associé, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Volatier Maïté**, Ph.D. Professionnelle de recherche, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Jaouad Abdelatif**, Ph.D. Professeur associé, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Trovao João**, Ph.D. Professeur adjoint, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Aimez Vincent**, Ph.D. Professeur titulaire, vice-recteur à la valorisation et aux partenariats, Université de Sherbrooke, Canada

**Etat :** soumis.

**Revue :** *Energy Independant*

**Keywords:** stand-alone building, sizing, genetic algorithm, solar power generation, climate impact, renewable

**Mise en contexte :** comme cela a été présenté dans le premier chapitre, notre bâtiment autonome doit se contenter de la seule ressource solaire locale fluctuante pour satisfaire les besoins énergétiques de ses occupants tout au long de l'année. Aussi, il est nécessaire qu'il stocke une certaine quantité d'énergie en période de forte production pour combler les besoins plus importants en hiver par exemple. Ainsi, un dimensionnement optimal de l'installation qui minimise le coût total du système tout en garantissant un fonctionnement normal tout au long de l'année doit être effectué. C'est précisément l'objectif de ce présent chapitre.

## 2.1 Résumé en français :

Dans cet article, une nouvelle approche est présentée pour étudier l'impact du climat local sur le dimensionnement optimal du système hybride d'un bâtiment autonome utilisant du photovoltaïque (PV), le vecteur hydrogène et des batteries. Une méthode générale est décrite pour évaluer le besoin thermique du bâtiment, ainsi que pour estimer la ressource solaire locale, ce qui permet de s'affranchir de l'accès à des données spécifiques (production/consommation). L'approche générale proposée offre la possibilité de réaliser une étude comparée entre différents lieux et climats, et un dimensionnement optimal d'un bâtiment autonome est ainsi réalisé pour 5 lieux choisis arbitrairement : Moscou, Le Caire, Paris, Hanoï et Montréal. Le dimensionnement optimal des différents composants, réalisé en utilisant un algorithme génétique (GA), est effectué pour chaque lieu, avec l'objectif de minimiser le coût total d'installation tout en contraignant la probabilité de pertes d'alimentation (Loss of Power Supply Probability LPSP) et l'état de charge du réservoir d'hydrogène sur l'année entière. Les résultats de dimensionnement démontrent que le climat local a un impact énorme sur le coût final en affectant à la fois la ressource solaire disponible ainsi que le besoin thermique du bâtiment, amenant ainsi une variation de 80% du coût total d'installation en fonction du lieu sélectionné.

## 2.2 Abstract

In this paper, a new approach to study the impact of the climate on the optimal resultant sizing of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid building is presented. A general method is described to evaluate the thermal need of the building, as well as the local photovoltaic resource, rather than using specific data available for large purpose applications. The proposed approach enables comparison studies between different places and climatic conditions. Considering a specific autonomous building, a comparative study is provided for different places worldwide: Moscow, Cairo, Paris, Hanoi and Montreal. A GA is used to provide an optimal size and energy capacity estimation for each location. The objective is to minimize the total cost while constraining the Loss of Power Supply Probability (LPSP) and the State of Charge (SoC) of the long-term storage element over one year. The sizing results between the different places demonstrate that the local climate has a huge impact on the final price, by highly modifying the PV resource and the thermal need of the building. The results demonstrate an 80% increase variation of the total installation cost as a function of the selected place.

## 2.3 Introduction

In 2018, more than 15% of the global population lives without any access to electricity, among whom more than 20% live in developing countries where a global electric grid is not available [29]. At the same time, the deployment of renewable energy sources is booming and still has a bright future in the following years: between 2010 and 2016, there have been almost two times more global average capacity additions of renewable systems than coal systems. Perspectives for the 20 following years show the same trend [30]. This leads to a significant decrease in price of renewable systems: for example, the installation price of a photovoltaic system decreased from around 12USD\$/Wp in 1998 to around 4USD\$/Wp in 2014 [31].

For buildings, they represent around 40% of primary energy needs worldwide and the current tendency is to develop structures using better materials and design that lead a real reduction in their energy needs [32]. This is shown in Canada, where “net zero” energy buildings require 4-times less energy than conventional buildings [33]. More and more projects are beginning to study the potential development of stand-alone facilities that use hybrid renewable energy sources like PV or wind turbine to answer the energy needs of the building [34].

The main difficulty in developing an energy-independent building is the sizing of its energetic components, because the system should work throughout the year, even if the current consumption is greater than expected or the PV production is too low. Up to now, the impact of the local climate has never been taken into account in the way it modifies the load of the building throughout the year, even if it is of paramount importance. An optimal sizing is necessary for security and reliability of the system [35]. Among the numerous former studies proposing the optimal sizing of a complete system, we can distinguish between those developing mono-objective design to the multi-objective ones. As it will be highlighted in this work, considering the accumulation effect of the batteries and the hydrogen tank ( $H_2$ -tanks), a chronological simulation is chosen to get a better representation of the overall operation.

Many different algorithms have been developed and are well-known nowadays. For example, Yang, Lu, Zhou and Fang proposed an optimal sizing of a stand-alone hybrid solar-wind system using a Genetic Algorithm (GA) that evaluates the Loss of Power Supply Probability to make a proper sizing of the facility under study [36]. They use weather data (daily radiation, average wind speed and ambient temperature) to estimate the PV production and wind production of the system. A year of hourly-based data of an arbitrary load is also used to feed the simulation, without giving any other details on their model, in order to be replicable.

In [37], a sizing using a multi-objective design is proposed for a stand-alone house. The authors have developed an Elitist GA applied to a Multi-Objective design of a hybrid PV-wind-battery system, using a real load profile. However, this real electric consumption data excluded uses for cooking, heating and hot water production. In other words, the overall thermal need of the house is not properly represented, leading to uncertainties in the sizing due to seasonal variation. In [38], the authors themselves mentioned the fact that the impact of the thermal demand on the

sizing should be investigated more deeply, even though they proposed a very efficient multi-objective algorithm for sizing.

Only few articles studied the long-term energy storage, on a multi-week timeframe. This is directly explained by the fact that the climate is never taken into account in the way it modifies the load of the building. Thus, the articles only focus on the PV or wind input of energy, varying with the seasons. However, this impact is not very important if the variation of the load of the building through heating is not taken into account. A stand-alone facility may lead to a decrease of robustness for the whole facility if the solar input does not match the estimated consumption. In [23], the authors propose a sizing of such a hybrid system, using hydrogen as a long-term storage system. The authors also propose different energy management strategies for sizing the system, that is to say, to define the size of the electrical devices and the energy capacity of the batteries and  $H_2$ -tanks, using an annual solar input, which included the seasonal variation. However, they simply propose an average daily load profile that does not include the seasonal variation of the thermal need of the building.

In [39], the authors have a closer look at the electrical load profiles of the building, showing the breakdown between each element (lighting, heating appliances, audio-visual and so on). They also make a distinction between a typical summer day and a typical winter day. However, there is no thermal study of the house, which makes it quite difficult to study the seasonal impact of the thermal consumption.

Many related works focus on a way to get an optimal sizing method, resulting in a methodology that only tries to make the sizing of a specific facility, place and configuration. More precisely, they use known electric load data and keep constant the weather under study, but do not focus on the link that exists between the climatic condition and the total load data of the building, as well as, the PV resource [40]. So far, the local climate impact on the sizing of the facility has not been analysed, whereas thermal models of buildings already exist and are well documented [41]. In this paper, a new approach is proposed. An optimal sizing of the stand-alone building using models to estimate the PV resource and thermal needs is proposed. Thus, the approach allows the comparison of various locations with different weather conditions, in order to highlight the impact of the climate on the sizing of stand-alone buildings. This method also allows an estimation without any previous knowledge of PV production or the total building load. The strengths of this method are based on the thermal demand (as well as the PV resource) that is estimated from scratch using very general information about the building and is not the result of any specific consumption data. A thermal model of the building along with an accurate solar resource estimation is used in order to evaluate the annual global thermal building requirement and annual solar production capacity. A three-noded thermal model of the building is used to estimate the thermal capacity quickly and accurately [15]. An electric consumption profile is simultaneously considered [42], to reach a general purpose model suitable to any place or climate conditions. Thanks to this general approach, a comparison study is available and realized for 5 different locations worldwide. For each location and by fixing the general features of a selected building, the maximum PV resource is estimated, and the load profile is determined.

Thereafter, a sizing is realized using a GA that aims to minimize the cost while constraining the Loss of Power Supply Probability (LPSP) and the final State of Charge (SoC) of the hydrogen storage elements ( $H_2$ -SoC). The robustness of the optimal sizing is validated for each location. Finally, a comparative analysis based on total cost is presented between the various locations. This paper is organized as follows: Section 2 describes the configuration of the hybrid system under study, the proposed sizing method, the input and output needed for the sizing and the simple used energy management strategy. Section 3 describes the modelling of the whole hybrid system, including the PV contributions and the electrical and thermal need of the facility under study. The simulation results are presented and discussed for one case study in section 4 and a comparison sizing is done and discussed between several places with different climates. Finally, Section 5 addresses conclusions and future steps.

## 2.4 Modelling and optimal sizing strategy

### 2.4.1 Hybrid system configuration

The full configuration of the energy independent hybrid system under study is presented in Figure 2.1. The hybrid system is composed of one PV array (which constitutes the only input of external energy), a battery pack and a hydrogen system. The hydrogen system is composed of an electrolyzer that converts the PV electricity into hydrogen that is then compressed into  $H_2$ -tanks for long-term storage. The hydrogen energy is given back to the DC grid through a fuel cell then connected to the DC bus through a DC-DC converter.

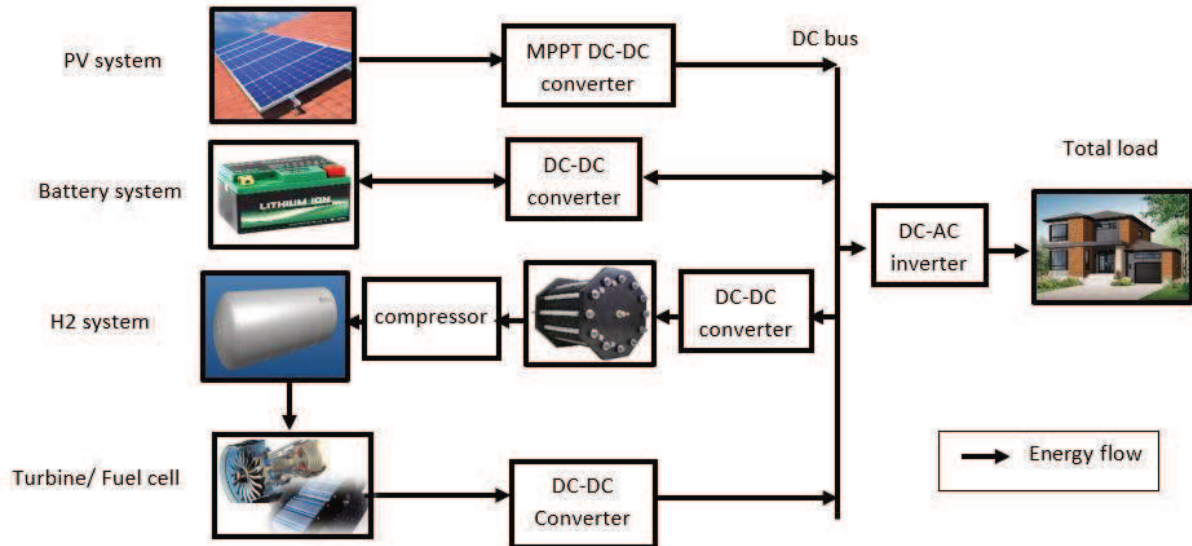


Figure 2.1 Schematic diagram of the stand-alone hybrid system

As the main objective of this work is the optimal sizing of an independent building's energy resources, the simulation should be fast and a sample resolution of 1 hour is selected. The very short-term power flow analysis is not considered and storage systems with fast dynamics (supercapacitors or flywheels) are not under evaluation here. However, these types of storage systems should be considered in the final stage design, to refine the energy management, help the battery pack and the electrolyzer with fast dynamic power variations and increase their lifetimes [43].

The input of energy is totally done by the PV array. The battery carries out the absorption and restitution of energy on the scale of a day and it is preferred to the  $H_2$ -system due to its better global efficiency. Store a huge amount of energy in batteries is highly expensive, but efficient from an energy point of view. On the other hand, store energy in the form of pressurized  $H_2$  is cheap, but the whole efficiency is low. A trade-off has to be made and a long-term storage in the form of pressurized  $H_2$  must be considered as it allows to reduce the total price of the system. The procedure used to size the energy independent house is as follows: first, the annual PV input of energy for the studied location is evaluated, as well as the annual thermal and electrical need of the house. Sizing the system is done by determining the number of PV cells, the number of batteries, the number of  $H_2$ -tanks and the rated power of the electrolyzer and its respective turbine. These five parameters should be selected in order to minimize the price while constraining the LPSP and  $H_2$ -SoC. The penalty function (PF) calculates the total investment cost, while the constraint function demonstrates an annual simulation of the system and returns the LPSP and  $H_2$ -SoC at the end of the year. That means the best configuration should be computed under five decision variables, leading to the use of a specific algorithm to quickly find the optimal solution. An optimization algorithm evaluates the defined penalty and constraint functions under a given configuration to return the optimal solution. As a stop condition for the algorithm, the system should operate under normal conditions at least 95% of the time ( $LPSP \leq 0.05$ ) under the lowest investment cost, with an  $H_2$ -SoC at the end of the year that is equal or superior to the one at the beginning, including a 5% margin.

### 2.4.2 Optimal Sizing Approach

To size the independent building, an hourly-based simulation of the whole system throughout the year is done considering a realistic Energy Management Strategy (EMS). The EMS proposed here is based on control states and is fully depicted in Figure 2.2.

Ipsakis, Voutetakis, Seferlis, Stergiopoulos and Elmasides present a parametric study of different EMS for the power management of a stand-alone system [25]. The results show that one of the presented EMS resulted in lower operation time and higher hydrogen inventory compared to the other EMS systems also tested. The EMS presented in this study is an evolved version of the best EMS presented in [44], considering the following improvements: the maximum power flowing through the batteries, the  $H_2$ -SoC of the  $H_2$ -tanks and a thermal recovery are considered, that results in the decision flowchart presented in Figure 2.2.



This logical block operates by steps : first, it is determined if we are in excess or in deficit of energy. If we are in excess, it means we can store this energy in the batteries and/or  $H_2$ -tanks. Batteries are considered first because of their better efficiency. At each step, it is checked that we do not overload the batteries and/or the electrolyzer. If we are in deficit of energy, it means we need to discharge the batteries and/or the  $H_2$ -tanks. Once more, batteries are considered first for efficiency reason. Then, we also take into account the possibility to recover thermal energy, as the global load is composed of a pure electric part and a thermal need that can come from electricity or thermal recovery.

This EMS has to be coupled with an optimization strategy to catch its full benefit resulting in an optimal sizing of the system. The optimal sizing needs to find the best combination of 5 integers variables where the penalty function is linear, and the inequality constraints are linearized . There are several strategies available for optimization purposes and some works have already been done to highlight that the use of evolutionary algorithms (EAs) is a very good approach for global and direct searches in our case [45]. Among them, simulated annealing, particle swarm optimisation (PSO), ant colony algorithm (ACA), taboo search or genetic algorithm (GA) are the most commonly used. Evolutionary algorithms (EAs) are stochastic search methods that mimic the social behaviour of species and/or the natural biological evolution to find a near-optimum solution for complex and large-scale optimisation problems. EAs like PSO, ACA or GA have been analysed and compared in the literature, resulting in similar performance [46]. Moreover, the sizing here deals with integer values that represent the number of batteries, tanks and PV arrays. We also consider fixed step of rated power for the turbine and electrolyzer, as manufacturers can't provide them for a very specific value. We have thus to deal with Mixed-Integer Linear Programming (MILP) while making the optimization. This kind of optimization is already known in designing building supply systems [47]. For instance, Lozano, Ramos and Serra proposed a cost optimization of the design of a building system using a MILP [48]. The Matlab's global optimization toolbox already proposes a function that enables to use a genetic algorithm to solve this kind of Mixed Integer Optimization problem. As this paper proposes to use an EA as a tool rather than compare different EAs each other, this function was thus selected in this study.

Thus, the EMS presented is coupled with a GA to properly size the stand-alone system. GA is nowadays used in a wide range of areas. GAs are inspired by natural biological process' improved fitness through evolution. At each generation, a set of possible solutions is returned, each solution is considered as an individual composed of set of elements called 'genes' that hold a set of values for the optimization variables. GA works with a random population of individuals, where each individual is evaluated through a penalty function (PF). The best individuals, if they equal or improve the solutions, are then used and mixed together (through mutation and crossover) to pave the way for the new generation of the population.

The PF (1) calculates the cost of the entire facility, given the number of batteries, PV arrays, the rated power of the electrolyzer and the turbine and finally the volume of  $H_2$ -tank.



$$P_{total} = p_{battery}N_{batteries}E_{battery} + p_{PV}N_{PV}Wp_{PV} + p_{electrolyzer}P_{electrolyzer} + p_{turbine}P_{turbine} + p_{tank}N_{tanks}E_{tank} \quad (2.1)$$

with:

- $p_{battery}$  and  $p_{tank}$  the price respectively for batteries and  $H_2$ -tanks (USD\$/Wh).
- $p_{PV}$ ,  $p_{electrolyzer}$ ,  $p_{turbine}$  the price respectively for the PV, electrolyzer and turbine(USD\$/W)
- $N_{batteries}$ ,  $N_{tanks}$  and  $N_{PV}$  number of batteries, tanks and PV arrays.
- $E_{battery}$  and  $E_{tank}$ , rated energy that can be stored in a battery or a tank.
- $Wp_{PV}$  peak power of the selected array.
- $P_{electrolyzer}$  and  $P_{turbine}$  rated power of the electrolyzer and the turbine.

For the GA, we set two constraints on the candidate solutions: the LPSP should remain below a threshold of 0.05 and the  $H_2$ -SoC at the end of the year should be no less than the amount found at the beginning of the year (sustainability condition). A threshold of 5% is set for the LPSP and the initial  $H_2$ -SoC is set equal to 50%.

The proposed PF (1) is linear, as well as the two constraints, but we do have 5 parameters to optimize in a very extensive domain. In these situations, classical algorithms generate a single point for each iteration and select the next point with deterministic computation are not appropriate. On the contrary, the GA which generates a population of several individuals at each step, is much more appropriate and ensures the best solution. For this reason, the GA was chosen for this application.

To evaluate the two constraints (LPSP and  $H_2$ -SoC), an hourly simulation of whole system is completed. At the end of the year time scope, the LPSP and  $H_2$ -SoC are evaluated. Thereafter, the GA is used to compute the optimal solution. The GA parameters are: a population size of 300 individuals, a maximum of 200 generations and a stall of the genes after 125 generations. To accelerate the simulation, parallel computing was used to utilize the 4 cores of the computer (Intel Core i7-7700HQ CPU @ 2.80GHz, 4 cores, 8 logical processors), resulting in an estimation that takes less than 5 minutes to compute.

It is critical that the simulation which evaluates the two constraints accurately represents the variation of the  $H_2$ -SoC and the battery SoC over the year. Indeed, it is only under this condition that we can ensure the whole system is properly sized and will operate well for at least 95% of the time. This means that a time scope of one year must be used. Some authors only consider a time scope of several weeks up to several months [44]. Moreover, the seasonal variation of the climate is almost never take into account in the global load of the building [49]. However, the seasonal variation of the climate should not be neglected, since the PV energy production and also the energy needed to heat the building over one-year are linked to the different seasons. The proposed model uses a full-year of climate data to estimate the thermal need and PV

production, which is the most accurate estimation since these needs and productions vary based on the climate throughout the year. Under this condition, the one-year simulation can provide reliable results on the performance of the independent building, by supplying accurate initial estimations of the LPSP and  $H_2$ -SoC.

## 2.4.3 Modelling of the hybrid system

### 2.4.3.1 Modelling electricity production from solar energy

For the hybrid system under study, the electric energy provided by the solar resource must be estimated. This must be a function of the PV arrays, the geographical position and the mechanical position of the arrays. The PV arrays performance is highly influenced by the local radiation and their orientation. Many studies propose a way to estimate the solar production [50]. The equations used are mainly extracted from [5], based on the most commonly used method of estimating energy solar production. Meteorological data for the considered location is gathered freely on the *EnergyPlus* website [7]. The position of the sun is obtained using the Duffie and Beckman's equation [51]. The isotropic sky model is used, as the panels mainly face the sun to maximize the photovoltaic production. This model is used to estimate the total solar radiation on a tilted surface by (2).

$$I_T = I_r R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + I \rho_s \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \quad (2.2)$$

with:

- $I_r$  : direct radiation ( $\text{J/m}^2$ ), obtained through the weather data
- $I_d$  : diffuse radiation ( $\text{J/m}^2$ ) (weather data)
- $\rho_s$  : Reflection coefficient of the ground ( $0 \leq \rho_s \leq 1$ )
- $I$  : Global horizontal radiation on a horizontal plane (weather data)
- $R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$  : a geometric factor
- $\beta$  : slope with respect to a horizontal plane. ( $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$ )

Once the total solar radiation is calculated for a specific hour of a specific day of the year, the solar production for that hour can be evaluated using (3):

$$E_k = S_{PV} I_T \eta_{mppt} \eta_{elec} \quad (2.3)$$

with:

- $E_k$  : energy produced during the hour k of the day considered (J)
- $S_{PV}$  : total area of the solar panels installed ( $\text{m}^2$ )
- $\eta_{mppt}$  : average efficiency of the whole installation equipped with a Maximum Power Point Tracker (MPPT) algorithm.

- $\eta_{elec}$  : loss mainly due to dust, the joule effect and standard deviation.

Finally, the efficiencies  $\eta_{mppt}$  and  $\eta_{elec}$  are estimated using equations mainly presented in [5], while the characteristics of the arrays are extracted from a solar panel directory [52].

### 2.4.3.2 Modelling of the thermal needs of the considered house

A method of determining a thermal need profile of the house throughout the year is presented bellow. To do so, the house is initially assumed to be a two-noded system, as shown in Figure 2.3.

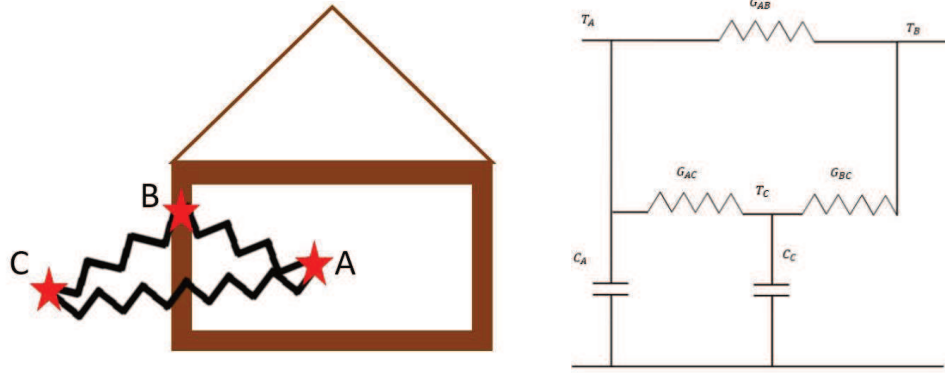


Figure 2.3 : Two-noded (or R3C2 model) thermal system representation of the building

This description is an adaptation of the one presented by Danza, Belussi, Meroni, Salamone, Floreani and Dabusti. [15], which is inspired by Crabb, Murdoch and Penman[14]. This approach is classified as a dynamic thermal model by [53]. Other authors suggest their own adaptation by varying the number of equivalent resistance or capacitance [54], [55].

Point A represents the ambient air inside the house, point B describes the walls and point C represents the external environment. For point A, the differential thermal equation that describes the system is computed by (4).

$$\frac{dT_A}{dt} = \frac{(-G_{AB}+G_{AC})}{C_A} T_A + \frac{G_{AB}}{C_A} T_B + \frac{P_{heat/A}}{C_A} + \frac{G_{AC}}{C_A} T_C \quad (2.4)$$

with:

- $T_A, T_B$  and  $T_C$  : ambient air, walls and external air temperature (K)
- $G_{AB}$  et  $G_{AC}$  : respectively, the equivalent conductance between the inside air and the walls and between the inside air and the outside air. (W/K)
- $C_A$  : heat capacity or thermal capacity, of the inside air (J/K)
- $P_{heat/A}$  : heat given from a heater inside the room plus irradiance from the sun through glazing.

The renewal of the inside air is included in the term  $G_{AC}$  of conductance between the inside and outside air of the room. Moreover, the house is roughly represented simply as a large room.

The last equation can be easily applied to the two other points. These equations lead to a matrix system to solve (see [Appendix B](#) for more details).

The raw weather data provides the external ambient temperature  $T_C$  throughout the year. Furthermore, the heat from the sun through the glazing of the house  $S_{gain}$  can be post-evaluated (a part of  $P_{heat/A}$  and  $P_{heat/B}$ , [53]) and is fully presented in [Appendix B](#). This approach can then provide the complementary heat that is needed to be provided through  $P_{heat/A}$  to maintain an average temperature inside the house of at least 20°C (that means we do not consider the energy consumption for cooling). An explicit resolution method is used to be sure there is no discrepancy in solving the equations.

For a specific case, the key parameters (equivalent conductance and heat capacity) of this kind of model need to be adjusted, so that the model can provide accurate results. To set these parameters, a tuning was performed to get an annual consumption per square meter in Montreal in the same order of magnitude to the country average (around 128 kWh/m<sup>2</sup>/year). This is only to fix the key parameters of the thermal model. Then these parameters remain fixed for all the other considered locations, for fair comparison purpose.

### 2.4.3.3 Modelling of the different subsystems

This section describes the calculations done by the GA for each hour throughout one year.

- **Whole hydrogen system:**

As shown in Figure 2.1, the entire hydrogen system is composed of one DC-DC converter, an electrolyzer and a turbine, for which the rated power  $P_{elec}$  and  $P_{turbine}$  vary. There is additionally a storage system for the  $H_2$ -tanks, with the number of tanks being an important design parameter. However, as the focus of this model is to analyse the energy flow, it is important to evaluate the SoC of the tank as well as the turbine and electrolyzer efficiency.

An alkaline electrolyser is considered due to its lower price compared to other technologies [56]. The efficiency of such an alkaline electrolyser is a function of the current density [57], as it is shown in Figure 2.4 (model extracted from [58]):

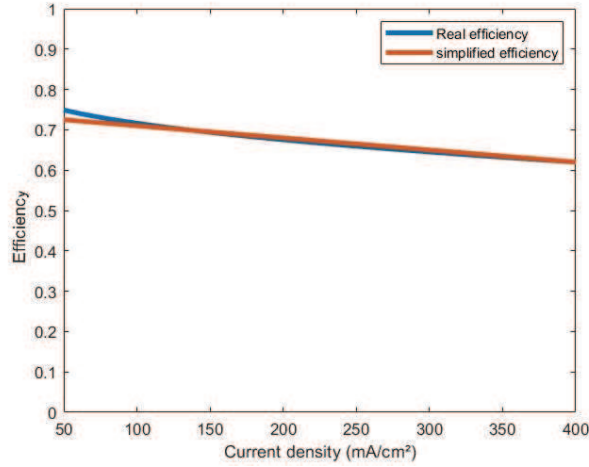


Figure 2.4 : Real and simplified efficiency of the electrolyzer

Thus, considering the power supplied to the electrolyzer, the efficiency is considered to be a linearly decreasing function of power, assuming a fixed rated power (red curve in Figure 2.4). To convert a power supplied to the electrolyser into a quantity of hydrogen, the net calorific value of  $H_2$  (or low heating value) is used ( $LHV_{H_2} \approx 119\,930$  kJ/kg.) This mass of  $H_2$  is added or subtracted to the amount that is available in the tanks. To do so, the equation of state of Van der Waals is used (5):

$$\left(P + \frac{an^2}{V^2}\right)(V - nb) = nRT \quad (2.5)$$

with:  $a \approx 0.0246$  Pa.m<sup>6</sup>/mol<sup>2</sup> and  $b \approx 0.00002655$  m<sup>3</sup>/mol. The storage temperature of  $H_2$  is assumed to be constant, equal to 15°C, and a 850 litre tank is assumed to have a maximum pressure of 60 bar [59].

- **Battery system mode:**

For this application, a Lithium-ion battery is considered. It is a 5 kWh battery pack (24 V, 360 Ah, 4 mΩ and voltage slope  $\delta = 0.05$  V/%). The electrical model used is defined by following set of equations.

During the sizing, the number of batteries  $N_{bat}$  is varying. It is assumed that the batteries are connected in parallel to become a block of batteries, in order to maintain the output voltage. Thus, the resulting parameters of the block are:

$$E_{block} = E_{bat}; C_{block} = N_{bat}C_{bat}; R_{block} = R_{bat}/N_{bat}; V_{bat} = V_{block} \quad (2.6)$$

with:

- $E_{block}$  : open circuit voltage of the pack of batteries (V).
- $C_{block}$  : nominal capacity of the pack of batteries (Ah).
- $R_{block}$  : internal resistance of the pack (Ω).

- $V_{block}$  : output voltage of the pack (V).

The maximum power that can be extracted from the block follows the equation [60]:

$$P_{bat\_max} = \frac{E_{bat}^2}{(4R_{block})} \quad (2.7)$$

That way, the current flowing through the batteries at a time  $t$  is equal to:

$$I_{block,t} = \frac{E_{bat} - \sqrt{E_{bat}^2 - 4R_{block}P_{block,t}}}{2R_{block}} \quad (2.8)$$

and the voltage can be evaluated using the equation:

$$V_{bat} = E_{bat} - R_{block}I_{block} \quad (2.9)$$

Finally, to manage properly the energy, the state of charge is needed and evaluated hour by hour using:

$$SOC_{bat,t} = SOC_{bat,t-1} \pm \frac{I_{block,t}}{C_{block}} \quad (2.10)$$

with: “-” indicating charging and “+” for discharging. Because we are using meteorological data that have a step of 1 hour, the current is supposed constant during an hour, even if this is not realistic. However, what matters the most for the sizing of the installation is the evolution of the different SOC's at a high level.

## 2.5 Results and discussion

### 2.5.1 Solar resource estimation

For each location, there is an optimal geometric position  $(\beta, \gamma)_{best}$  that leads to the optimal solar production. Indeed, the solar production of the PV installation is a strong function of the mechanical position of the panels: the slope  $\beta$  and the surface azimuth angle  $\gamma$ . The following figures are plotted using the meteorological data of Montreal. Figure 2.5 shows the importance of  $(\beta, \gamma)$  on the annual solar production, where these two angles are varying, and the annual PV production is scaled by the power of the installation presented. Tests have been conducted for Montreal and show that in order to maximize the solar energy produced,  $\gamma \approx 0^\circ$  and  $\beta \approx 30^\circ$  should be selected.

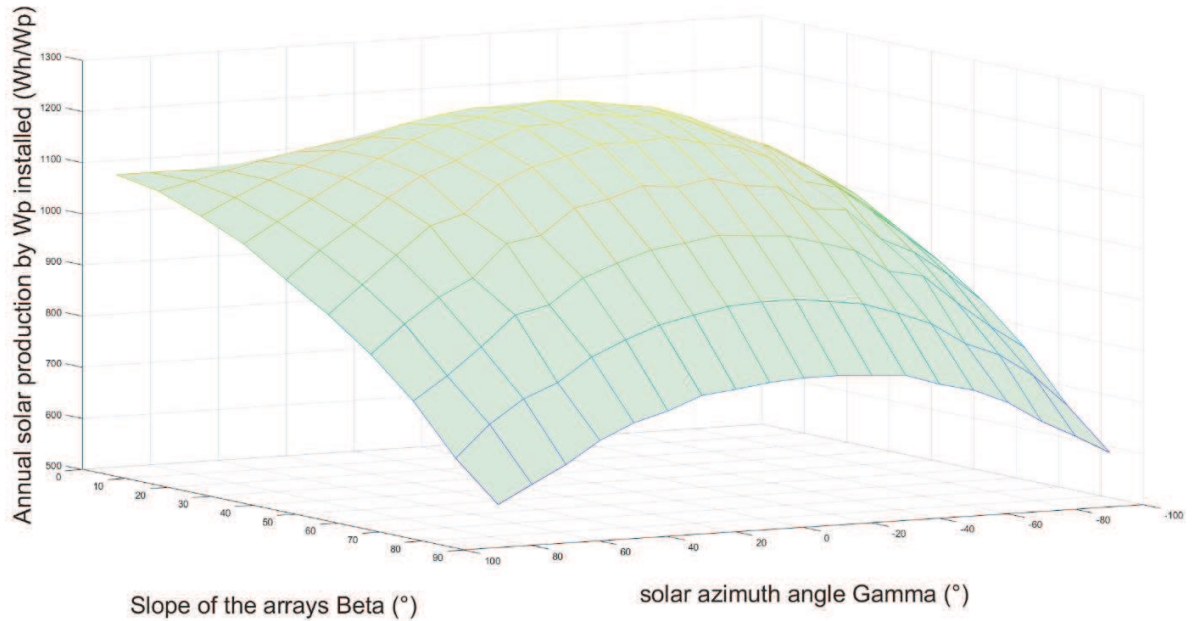


Figure 2.5 : Annual PV production as a function of  $\beta$  and  $\gamma$  at Montreal

Table 1 shows the annual solar energy produced at each location under consideration (Paris, Montreal, Moscow, Cairo and Hanoi), representing a wide range of different climates.

Tableau 2.1 : Best annual solar production for the 5 places under study

Local	Slope $\beta$ (°)	Azimuth $\gamma$ (°)	Annual production	Relative gap (Montreal)
<b>Montreal</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>1.23</b>	<b>0%</b>
<b>Cairo</b>	<b>20</b>	<b>0</b>	<b>1.73</b>	<b>+41%</b>
<b>Paris</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>0.98</b>	<b>-20%</b>
<b>Hanoi</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>1.33</b>	<b>+8%</b>
<b>Moscow</b>	<b>30</b>	<b>-10</b>	<b>0.91</b>	<b>-26%</b>

This table highlights that the solar energy produced is a strong function of the location: the same arrays installed in Cairo will produce 41% more energy than the same ones if installed in Montreal. For the optimal sizing strategy using the GA, this best configuration is selected for each location. It is also interesting to notice that in order to optimize the PV production on the whole year, the arrays should in all cases more or less face the South, which is in agreement with the fact that all the locations selected are in the Northern hemisphere, meaning that the sun is due South at the solar midday. Moreover, a link seems to appear between the latitude of the location and the best slope, as suggested by the Table 2 .

Tableau 2.2 : Angle between best slope and latitude of the location

Local	Slope $\beta$ (°)	Latitude $\phi$ (°)	Difference (°)
<b>Montreal</b>	<b>30</b>	<b>45</b>	<b>15</b>
<b>Cairo</b>	<b>20</b>	<b>30</b>	<b>10</b>
<b>Paris</b>	<b>30</b>	<b>49</b>	<b>19</b>
<b>Hanoi</b>	<b>15</b>	<b>21</b>	<b>7</b>
<b>Moscow</b>	<b>30</b>	<b>55</b>	<b>25</b>

Indeed, an angle of roughly 15° should be deduce to the current latitude to give the optimal slope, if the climate is not too wet and foggy. However, for Hanoi, the diffuse radiation has a



greater importance to the global solar radiation, meaning that the inclination of the arrays has minor impact on the resulting solar production.

Moreover, in the best configuration, the solar production fluctuates a lot throughout the year, as it is highlighted for the case of Montreal.

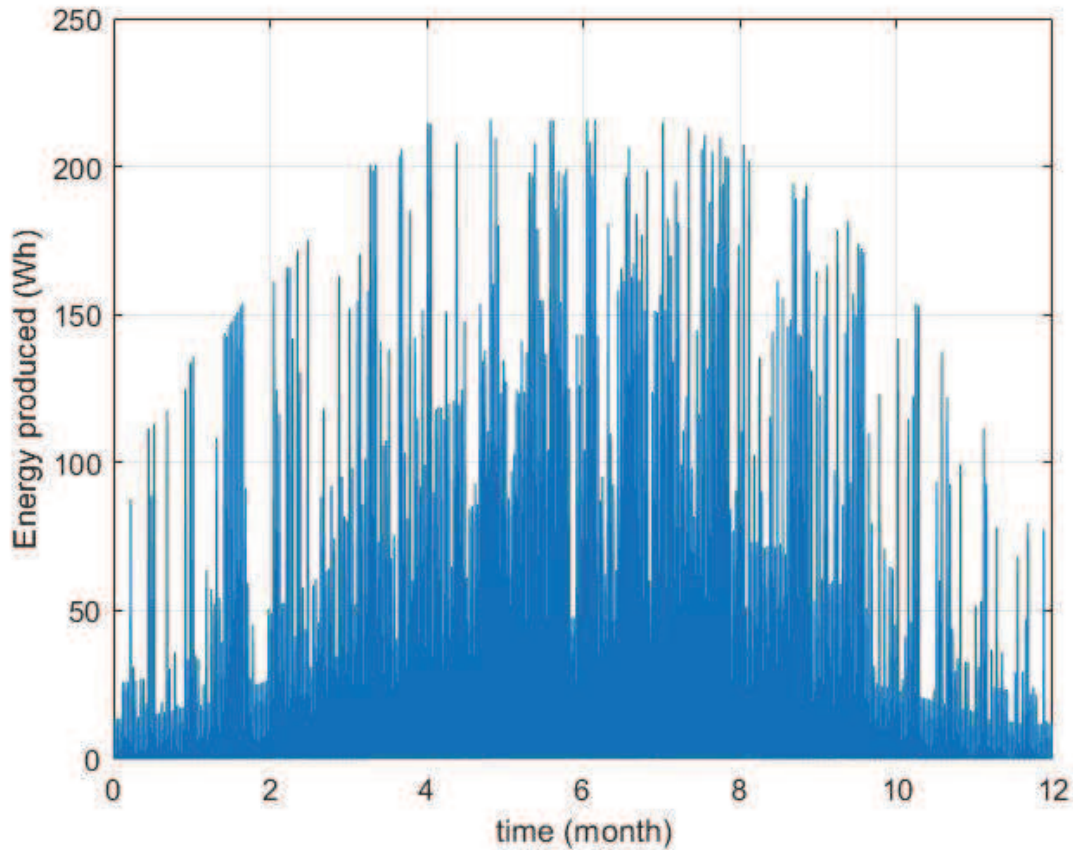


Figure 2.6 : Solar production throughout the year for the case of Montreal in optimal position

We clearly notice that the optimal configuration tends to maximize the production in Summer, while minimizing it in Winter. This will lead to a high need of energy storage, as explained in the following section.

### 2.5.2 Thermal demand of the building

A specific building was used to create a thermal profile for each location. The features of the building are: a Living Area of 200 m<sup>2</sup>; thermal conductance  $U$  of 0.25 W/(m<sup>2</sup>K) for the roof, 0.5 W/(m<sup>2</sup>K) for the walls and 6 W/(m<sup>2</sup>K) between the inside air and the walls. Building height is 6m and the percentage of renewal air volume per hour is  $n=30\%/h$ . These features give an annual

consumption per square meter for Montreal in the same order of magnitude as the country average (around 128 kWh/m<sup>2</sup> for heating in 2015, [61]).

The thermal response for the building under study in Montreal is presented in Figure 2.6.

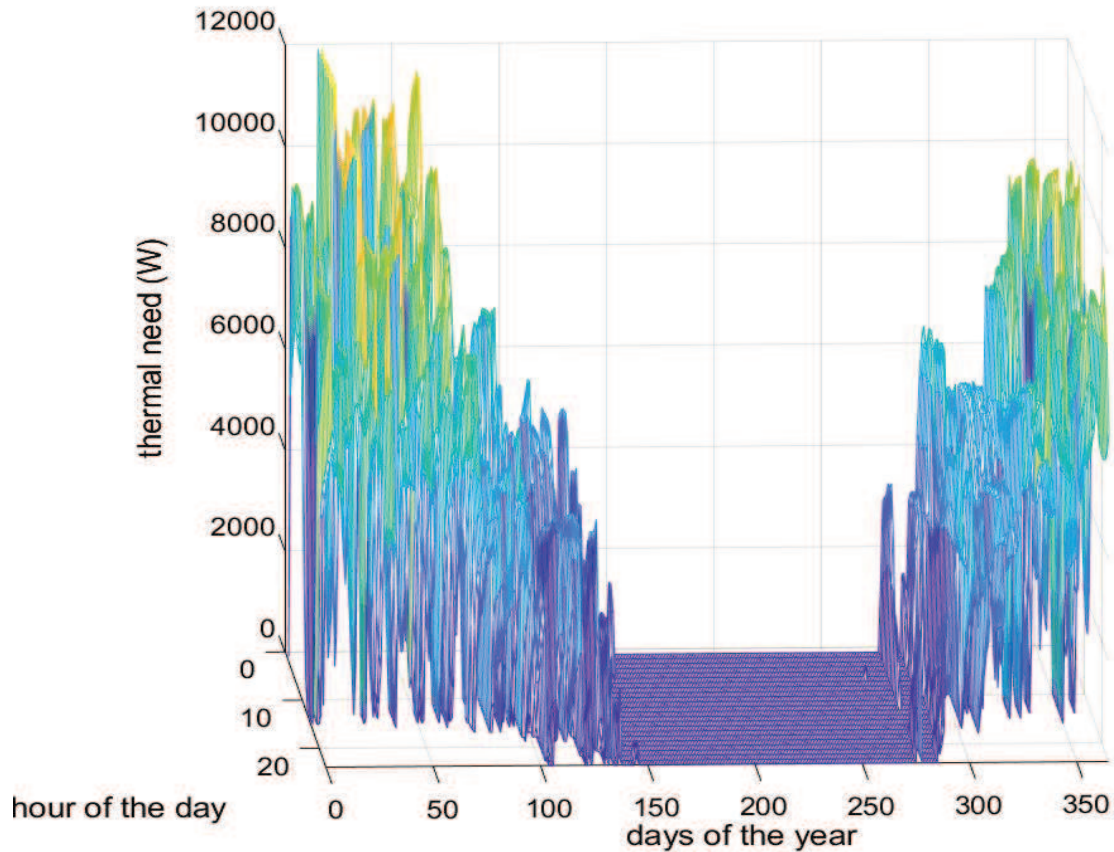


Figure 2.7 : Thermal demand throughout the year in Montreal

Figure 2.6 highlights clearly the seasonal impact of the local climate on the thermal demand of the house. This seasonal impact is consistent with more specific studies presented in [54].

We can notice a high thermal demand between November and March, with peak values in January. However, during that period, the PV production is also low compared to what can be produced in Summer. Since the higher thermal needs occur when the solar energy production is low, the stand-alone system has to store a huge amount of energy to face these periods.

A summary of the annual consumption for heating at the different locations is presented in Table 2.3, using the model presented in the last chapter.

Tableau 2.3 : Annual consumption for heating for the 5 locations under study

Place	Annual consumption for heating	Relative gap (Montreal as
<b>Montreal</b>	<b>121.3</b>	<b>0%</b>
<b>Cairo</b>	<b>1.35</b>	<b>-99%</b>
<b>Paris</b>	<b>70.6</b>	<b>-41.8%</b>
<b>Hanoi</b>	<b>3.8</b>	<b>-97%</b>
<b>Moscow</b>	<b>139.3</b>	<b>+14.8%</b>

Results highlight the primary impact of the local climate on the heating consumption of the building. Indeed, with the same building and simply by changing the environment with solar input that warms the building and the exterior temperature, the annual consumption fluctuates from almost 100% from a place to another. This heating consumption could thus become negligible compared to an average electrical consumption of 85 kWh/m<sup>2</sup>/year for warm places like Cairo or Hanoi, as well as it can also be of paramount importance for cold places like Montreal or Moscow.

### 2.5.3 Optimal Sizing for the different locations

To size the energy systems, the different research spaces are set as shown in Table 4.

Tableau 2.4 : Range of variation and price of the parameters used for the sizing procedure

Element	Range of variation	price
Battery (5kWh)	1 to 15, by step of 1	380 USD\$/kWh
PV arrays (250 Wp)	1 to 500, by step of 1	2800 USD\$/kWp (total
Max power of electrolyzer	1 to 50 kW, by step of 0.5kW	1500 USD\$/kW
Max power of the fuel cell	1 to 50 kW, by step of 0.5kW	1500 USD\$/kW
Number of $H_2$ -tanks (0.85m <sup>3</sup> )	1 to 200, by step of 1	10 USD\$/kWh

The prices selected are in magnitude what is available nowadays. For the  $H_2$ -tanks, [62] propose to use around 6 USD\$/kWh, whereas it is rather 10 USD\$/kWh in [63]. The alkaline electrolyzer's price is around 1500 USD\$/kW as suggested by [56]. For the batteries, the market is moving quickly but 380 USD\$/kWh is in agreement with [42]. Eventually for the fuel cells, price is highly function of the size of the system itself, but 1500 US\$/kW seems to be reachable in most of the cases [64].

The electrical consumption (excluding heating) of the house is set to 85 kWh/m<sup>2</sup>/year regardless of the location. This is an average consumption, including domestic hot water, cooling, lighting and household appliances. This consumption is mapped throughout the year using the profile of normalized French residence available from ENEDIS [65], presented in Figure 2.3.

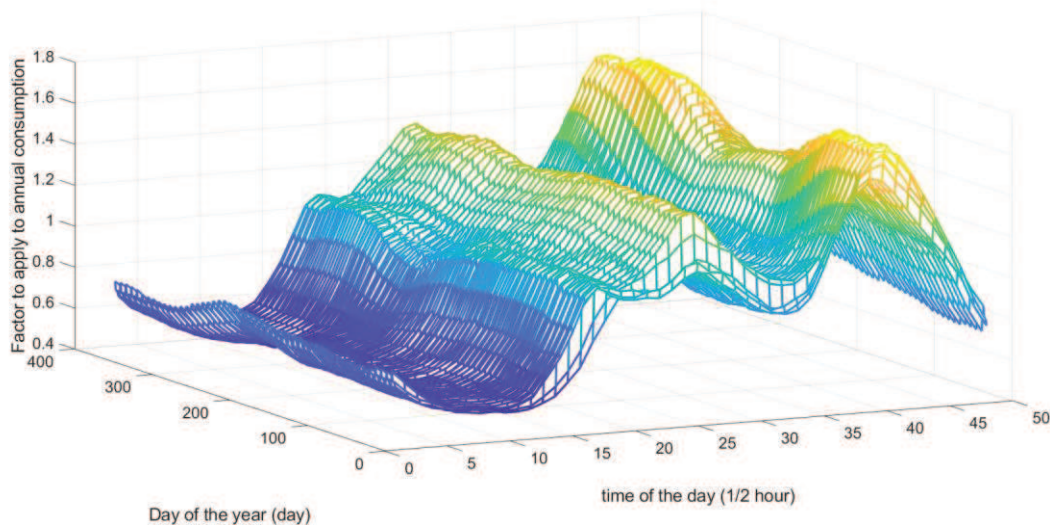


Figure 2.8 : Profile of normalized French residence

The sizing results for Montreal are presented in Figure 2.9.

Place	Montreal
Electrical consumption (MWh/year)	17
Thermal consumption (MWh/year)	25.2
Total consumption (MWh/year)	42.2
Solar production (kWh/Wp/year)	1.2
PV installed power (kWp)	45.5
Batteries capacity (kWh)	55
Total tank capacity (kWh)	8720
Energy reserve (equiv. week/Total annual need)	10.7
Electrolyzer rated power (kW)	22.5
Fuel cell rated power (kW)	5
Total cost of the whole system (kUSD\$)	345.4

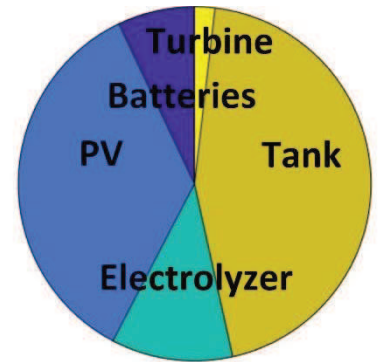


Figure 2.9 : Results of the sizing using GA of the stand-alone system implanted in Montreal

The results lead to a very expensive global system, essentially due to a very high capacity of energy storage. We define the energy reserve as:

$$\text{Energy Reserve (weeks)} = 52 \frac{\text{Tank capacity}}{\text{Total annual need}} \quad (2.11)$$

Considering the case of Montreal, the energy reserve request is above 10.7 weeks. This highlights the seasonal impact of the climate that leads to a high storage capacity requirement. This also suggests that the thermal need of the house should be reduced, by developing better thermal resistance of the building to reduce the overall system cost.

The SoC for the batteries and the tanks are represented in Figure 2.8. The batteries have an average SoC of 57% but are used heavily throughout the year. The  $H_2$ -SoC reveals the seasonal impact of the climate, with a period of global deficit during the winter, resulting in a continuous decrease of hydrogen stored in the tanks.

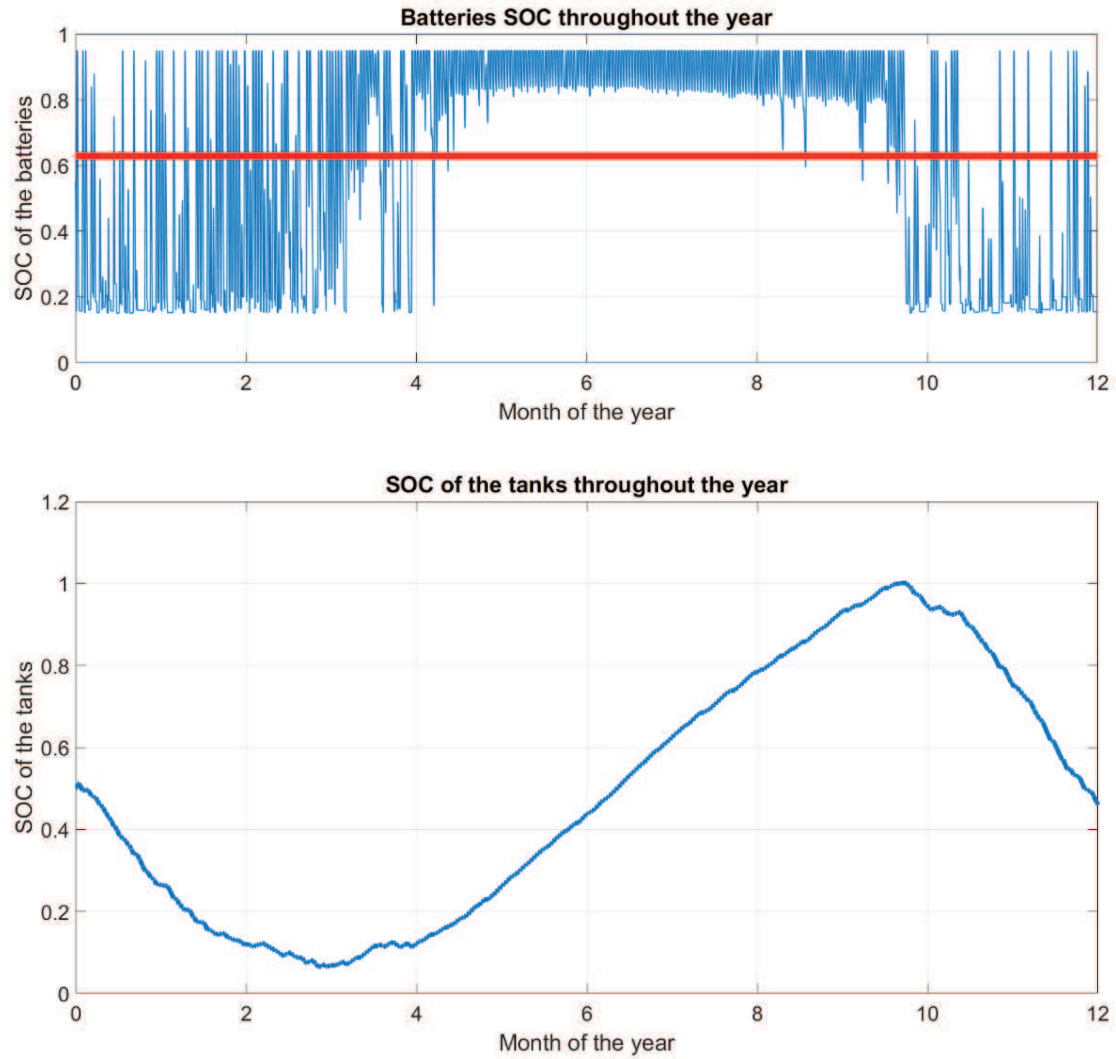


Figure 2.10 : : SoC of the batteries and the tanks throughout the year

This is interesting to notice the sinusoidal variation of the  $H_2$ -SoC throughout the year, which has not been superimposed but is the result of the optimal sizing provided by the GA. We should also observe the daily scale of variation of the batteries SoC, which is also a consequence of the optimal sizing.

To validate that the sizing is almost optimal in the case under study, a verification procedure has been developed. For verification, the optimization procedure was repeated ten times and the results were saved and compared. Fixing LPSP=0.05, the ten solutions returned by GA are grouped, with a maximum relative gap of 1.4% (with the best solution as a reference). The results are presented for the case of Montreal and Paris in Table 5.

Tableau 2.5 : Repetition of the optimization routine

Test	Montreal: Final penalty	Paris: Final penalty
1	346.2	300.5
2	345.45	299.82
3	348.75	301.34
4	350.34	302.45
5	348.09	302.15
6	346.95	298.87
7	346.54	300.0
8	348.29	302.56
9	345.93	298.87
10	347.31	301.65

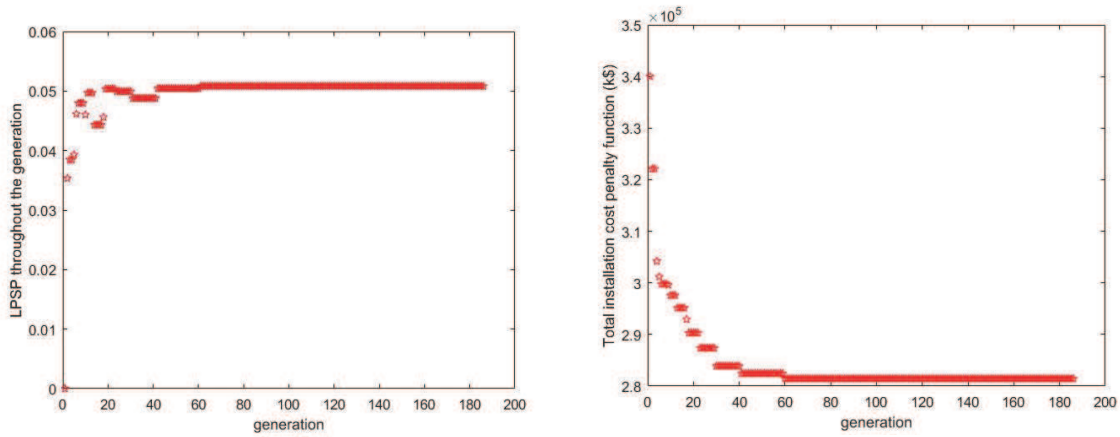


Figure 2.11 : LPSP and Total installation cost throughout the generation (Montreal)

Throughout the generation, the optimal individual is presented above for the optimal sizing obtained. It is shown quite obviously that as the price is decreasing, the LPSP is increasing, but remains just under the maximum target of 0.05.



The same methodology is used for the other locations and the key parameters for the sizing obtained by the GA are summarized in Table 6.

Tableau 2.6 : Compared sizing results for different locations using GA.

Place	Montreal	Cairo	Paris	Hanoi	Moscow
Electrical consumption (MWh/year)	17	17	17	17	17
Thermal consumption (MWh/year)	25.2	0.3	14.7	0.8	28.7
Total consumption (MWh/year)	42.2	17.3	31.7	17.8	45.7
Solar production (kWh/Wp/year)	1.2	1.7	1	1.3	0.9
PV installed power (kWp)	45.5	14.8	44.8	21.5	68.3
Batteries capacity (kWh)	55	25	60	20	55
Total tank capacity (kWh)	8720	400	6800	1200	12480
Energy reserve (equiv. week/Total	10.7	1.2	11.2	3.5	14.2
Electrolyzer rated power (kW)	22.5	1	16	6.5	32.5
Fuel cell rated power (kW)	5	1	3.5	1	5
Total cost of the whole system	345.4	60.9	298.9	100.5	491.3
Relative gap (Montreal=reference)	0%	-82.4%	-13.5%	-70.9%	+42.2 %

The GA sizing coupled with the proposed methodology reveals that the climate has a huge impact on the total cost of the system. For the climates with a harsh winter (Montreal, Paris, Moscow), the sizing reveals a need for about 10 weeks of energy reserve in order to overcome the winter energy demands. This energy reserve appears quasi-constant for Paris, Montreal and Moscow, whereas the tank capacity and the thermal consumption for these locations vary from almost 100%. Thus, the parameter introduced seems to be relevant and can allow a fast sizing of the system knowing for instance the thermal consumption. Moreover, in term of the repartition of each key element on the total price, these tough climates result in an optimal system that has the same features, as it is shown in Figure 2.9.



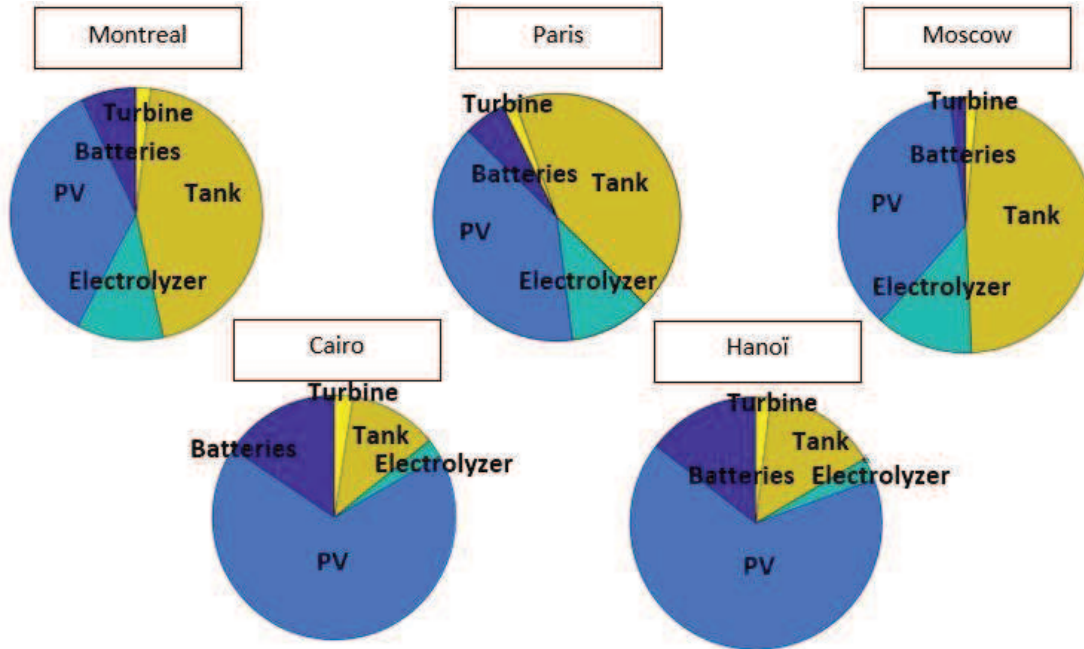


Figure 2.12 : Visualization of the total cost breakdown for each place

We can thus remark that the PV arrays and the tanks cover more than two third of the global price. This directly results in a much higher cost much higher compared to the places where there is no need for an energy reserve, like Hanoi and Cairo. However, even for these tough climates, a huge variation still exists, depending on the degree of severity of the climate (from 299 kUSD\$ in Paris up to 491 kUSD\$ in Moscow). Moreover, for warm climates, the optimal solution seems to converge towards another constant configuration, where the PV system weighs for around  $\frac{3}{4}$  of the total installation price, and the lasting part is equally distributed between the battery system on one hand, and the fuel cell, tanks and electrolyzer on the other hand. Thus, when there is not a big need for energy storage, the PV system remains the most expensive part of the system. These results suggest that some places are much more suitable for the developing of stand-alone systems than others. The results also suggest work should be done to reduce the thermal need of the buildings, or to find a way to reduce the resulting high cost of storage systems. Another possibility is the hybridization of the considered system with a wind fuel cell or trying to use heat pump that can multiply the thermal energy available by its high efficiency. Unfortunately, these systems (heat pump or fuel cell) currently have high cost. Also, a gas boiler to partially heat the building can be considered, but its impact should be validated.

## 2.6 Conclusion

This paper has presented a sizing method using a GA to implement a stand-alone hybrid system while minimizing the total cost of the system. Thanks to the proposed global approach, the sizing can be adjusted for different locations worldwide in a systematic way.

The analysis of 5 locations with different climatic conditions highlights that some places are much more suitable for developing stand-alone buildings than others. Considering Montreal as a reference, the same autonomous building will be 44% more expensive in Moscow and more than 80% cheaper if implemented in Cairo. This is due to the local climate, which modifies the solar resource and thermal need of the building. Also, a solar panel in its best orientation will produce 40% more electricity in Cairo and 25% less electricity in Moscow. Additionally, the same building will need around 99% less energy for heating in Cairo and almost 15% more energy in Moscow.

The model also highlighted that for cold climates, the thermal need during the winter is the major contributor to the cost of the stand-alone system. In such cases, proper insulation of the house is of paramount importance to enable a stand-alone building to be efficient.

This study is a first step towards the implementation of a stand-alone building that considers the climatic conditions of the location. Once a system is sized, it is then necessary to develop a real-time energy management strategy, that controls the energy flows between the different subsystems. Work on this is underway.

## 2.7 Appendix A : Compared analysis on the orientation of the panels

In the previous results, the configuration that maximises the annual PV production has been chosen. This resulted in a production that is maximized during the summer, when there is no significant thermal need. However, one may suggest that a configuration that conduct to maximize the PV production during winter, in order to better fit with the need of the building. Indeed, by tilting the arrays a little bit more, the production is at its highest level in winter and lowest level in summer, as presented in Figure 2.11.

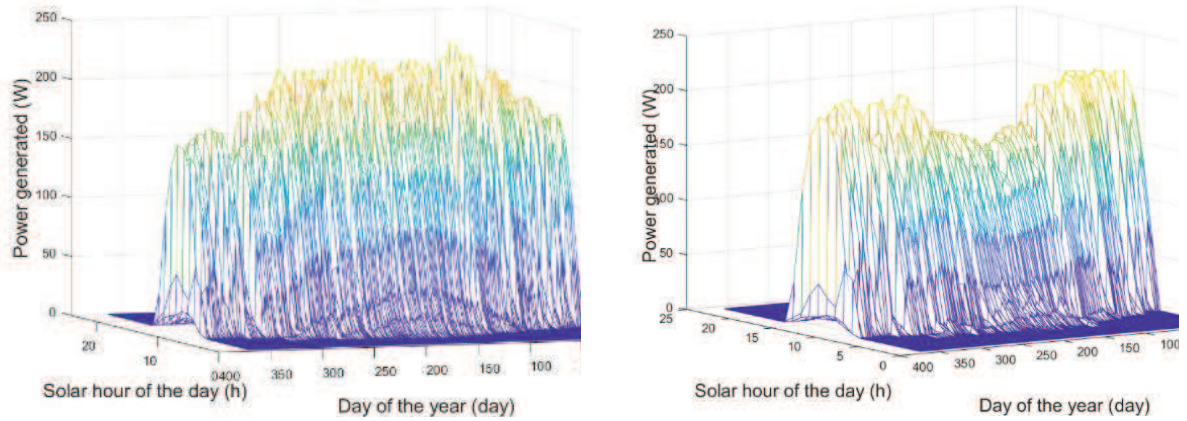


Figure 2.13 : Solar production for one array in Montreal tilted towards south at: 70° (right) and 30° (left)

However, at  $\beta \approx 70^\circ$ , the annual solar production is much lower than the production expected for  $\beta \approx 30^\circ$ : that represents 15.45% less of annual solar production. This finally leads to a total installation cost that is a slightly higher, even if there is a better match between the PV production and the global requirement of the building, as presented in Table 7.

Tableau 2.7 : Compared result for two different configurations of the arrays

Montreal, solar azimuth angle $\gamma = 0^\circ$	$\beta = 30^\circ$	$\beta = 70^\circ$
Electrical consumption (MWh/year)	17	17
Thermal consumption (MWh/year)	25.2	25.2
Total consumption (MWh/year)	42.2	42.2
Solar production (kWh/Wp/year)	1.2	1
PV installed power (kWp)	45.5	52.8
Batteries capacity (kWh)	55	55
Total tank capacity (kWh)	8720	7920
Energy reserve (equiv. week/Total annual need)	10.7	9.7
Electrolyzer rated power (kW)	22.5	24.5
Fuel cell rated power (kW)	5	5
Total cost of the whole system (kUSD\$)	345.4	354.4
Relative gap (Montreal as reference)	0%	+2.6%

However, the results highlight a possibility for the design of the installation: with a different geometric configuration of PV arrays, which provides a higher production during the winter, the price increases very slightly, but the total volume of  $H_2$ -tanks decreases.

## 2.8 Appendix B: Thermal matrix system and evaluation of the solar gain

Considering, the thermal matrix system:

$$\frac{d\vec{T}}{dt} = \vec{A}\vec{T} + \vec{B}\vec{U}; \quad (2.12)$$

$$\text{with: } \vec{T} = \begin{pmatrix} T_A \\ T_B \end{pmatrix}; \vec{A} = \begin{pmatrix} -\frac{G_{AB}+G_{AC}}{C_A} & \frac{G_{AB}}{C_A} \\ \frac{G_{AB}}{C_B} & -\frac{G_{AB}+G_{BC}}{C_B} \end{pmatrix}; \vec{U} = \begin{pmatrix} P_{heat/A} \\ P_{heat/B} \\ T_C \end{pmatrix}; \vec{B} = \begin{pmatrix} 1/C_A & 0 & G_{AC}/C_A \\ 0 & 1/C_B & G_{BC}/C_B \end{pmatrix}$$

To present it, it is necessary to fix some parameters of the building:

- Areas of glazing:

$$\begin{aligned} A_{g,north} &= 3m^2; A_{g,south} = 25m^2; A_{g,east} = 8m^2; A_{g,west} = 7m^2; \\ A_{g,total} &= \sum_{i=1}^4 A_{g,i} \end{aligned} \quad (2.13)$$

- Glass features: Thermal conductance  $U_{glass}=2.6 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ; Extinction coefficient  $K=15 \text{ m}^{-1}$ , thick  $e=3.5\text{mm}$  and number of panes  $n_{panes} = 2$ .

To evaluate the solar radiation that crosses each glazing, it is proposed to adapt a method from [5]. For each area of glass, the incidence angle  $\theta_1$  of the direct radiation is evaluated, then the absorption and transmission coefficient are calculated for that angle, using (14):

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (n_1 = 1 \text{ for air}, n_2 = 1.526 \text{ for glass}) \quad (2.14)$$

- Transmission coefficient for absorption:

$$\tau_\alpha = \frac{I_{transmitted}}{I_{incident}} = e^{\left(\frac{-K \cdot L \cdot n_{panes}}{\cos(\theta_2)}\right)}; \quad (2.15)$$

- Transmission coefficient for reflection:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1-r_{//}}{1+(2 \cdot n_{panes}-1) \cdot r_{//}} + \frac{1-r_{\perp}}{1+(2 \cdot n_{panes}-1) \cdot r_{\perp}} \right). \quad (2.16)$$

with:  $r_{//} = \frac{\tan^2(\theta_2-\theta_1)}{\tan^2(\theta_2+\theta_1)}$  the parallel component of unpolarized radiation and  $r_{\perp} = \frac{\sin^2(\theta_2-\theta_1)}{\sin^2(\theta_2+\theta_1)}$  the perpendicular component of unpolarized radiation.

For the diffuse and reflected radiation, an equivalent angle  $\theta_{1,equiv}$  is used from the depicted approach in [66].

The average absorption of the house is evaluated using the equation:

$$\alpha_{real,room} = \frac{\alpha_{room}}{\alpha_{room} + (1-\alpha_{room}) \cdot \tau_d \cdot A_{g,total} / (A_{room} - A_{g,total})}, \quad (2.17)$$

with  $\alpha_{room} = 0.45$  average absorption coefficient of the inner walls,  $A_{room}$  total inner areas of all the walls ( $m^2$ ) and  $\tau_d$  average transmission coefficient for the diffuse radiation of the room.

For each facade of the building, as it is done for the solar resource estimation, the direct, diffuse and reflected radiation need to be evaluated separately:

$$\begin{aligned} S_{gain,North} = & I_{r,north} \cdot R_b \cdot \alpha_{real,room,direct} \cdot \tau_{\alpha,direct} \cdot \tau_{r,direct} + I_{d,north} \cdot \\ & \left( \frac{1+\cos(\beta)}{2} \right) \cdot \alpha_{real,room,diffuse} \cdot \tau_{\alpha,diffuse} \cdot \tau_{r,diffuse} + I \rho_s \left( \frac{1-\cos(\beta)}{2} \right) \cdot \\ & \alpha_{real,room,albedo} \cdot \tau_{\alpha,albedo} \cdot \tau_{r,albedo} \end{aligned} \quad (2.18)$$

Eventually, the radiation collected by the building is obtained using (19):

$$S_{gain} = S_{gain,North} + S_{gain,South} + S_{gain,East} + S_{gain,West} \quad (2.19)$$

The radiation can be evaluated hourly throughout the year based on the energy coming from the sun and collected by the building. These equations can be solved to get the annual thermal demand of the house.

## 2.9 Appendix C: Efficiency of the PV solar panels

The efficiencies  $\eta_{mppt}$  and  $\eta_{elec}$  are estimated using the following equations:

$$\eta_{mppt} = \eta_{mpref} * \left\{ \begin{aligned} & 1 - \frac{\mu_{mp}}{\eta_{mpref}} * (T_a - T_r) \\ & - \mu_{mp} * \frac{\tau \alpha * I_t}{U * \eta_{mpref} * 3600} * (1 - \eta_{mpref}) * Zi \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

$$\eta_{elec} = \eta_i * k_{IAM} * (1 - P_s - P_M - P_O - P_P) \quad (2.21)$$

With :

$\eta_{mpref}$  : the rated efficiency of the solar panel at its MPPT point (manufacturer's data)

$\mu_{mp}$  : temperature coefficient at the MPPT point (manufacturer's data)

$T_a$  and  $T_r$  : respectively, ambient and reference (=25°C) temperature

$U$  : global heat transfer coefficient,  $U \approx 800 * \tau \alpha / (T_{NOTC} - 20)$ , with  $T_{NOTC}$  corresponding to the fixed temperature of the cell in standard condition (°C)

$Zi$  : intermediate calculation (see : [5])

$\eta_i$ : efficiency of the DC-DC converter

$k_{IAM}$  : incidence angle modifier

$P_s, P_M, P_P$  and  $P_O$  : dust loss (0.2%), deviation between real and specified operation (3%), loss due to deviation between real and standard I/V curves (2%), and ohmic loss (0.4%).

# CHAPITRE 3

## DEVELOPPEMENT DE STRATEGIES DE GESTION D'ENERGIE

**Titre original :** Stand-Alone Hybrid Autonomous Building: Modelling Approach to Energy Management Definition

**Auteurs et affiliations :**

**Voisin Jules**, Département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Darnon Maxime**, Ph.D. Professeur associé, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Volatier Maïté**, Ph.D. Professionnelle de recherche, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Jaouad Abdelatif**, Ph.D. Professeur associé, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Trovao João**, Ph.D. Professeur adjoint, département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université de Sherbrooke, Canada

**Aimez Vincent**, Ph.D. Professeur titulaire, vice-recteur à la valorisation et aux partenariats, Université de Sherbrooke, Canada

**Etat :** soumis.

**Revue :** *Applied Energy*

**Keywords:** stand-alone building, modelling, EMR, Energy Management, renewable

### Mise en contexte :

Le précédent chapitre a présenté une façon de prendre en compte le climat local pour effectuer un dimensionnement optimal du bâtiment autonome. Cependant, les paramètres de sortie de l'algorithme demeurent très généraux, en obtenant par exemple le nombre de batteries ou de panneaux photovoltaïques ou le volume du réservoir d'hydrogène à utiliser. Dans ce chapitre, on s'intéresse plus spécifiquement au modèle électrique précis de l'installation complète et à la façon de gérer efficacement les flux énergétiques entre les différents systèmes. L'objectif est alors de démontrer l'impact important de la stratégie de gestion d'énergie sur les performances du bâtiment autonome.

### 3.1 Résumé en français :

Dans cet article, une nouvelle approche est présentée pour modéliser un bâtiment autonome composé de PV, batteries, super capacités et utilisant le vecteur hydrogène. De plus, deux stratégies de gestion d'énergie (EMS) sont présentées et comparées. Un modèle dynamique précis de chaque élément du système est décrit. Chaque modèle est structuré en utilisant la Représentation Energétique Macroscopique via une modélisation orientée sur le contrôle de chaque sous-système. Une stratégie de simplification utilisant des tables de conversion (Look-up Tables) est présentée pour accélérer la simulation du système complet tout en préservant un niveau de précision satisfaisant sur les variables énergétiques d'intérêt. Cette stratégie de simplification est validée par simulation et le gain de temps obtenu varie de 10 à près de 300 fois le temps nécessaire pour simuler le sous-système complet et sa structure maximale de commande. Enfin, un modèle électrique général de l'ensemble de l'installation est présenté et simulé pour un cas particulier. Une stratégie de gestion d'énergie simple est développée en utilisant de simples règles booléennes combinées à du filtrage. Cette stratégie est ensuite comparée à une stratégie plus avancée utilisant la Logique Floue pour améliorer la gestion des flux énergétiques entre les différents éléments. Les résultats démontrent à la fois un gain de temps de simulation important ainsi que l'importance de la stratégie de gestion d'énergie sur le bon fonctionnement du système complet.

### 3.2 Abstract

In this paper, a new approach for modelling a PV/hydrogen/supercapacitor/battery-based hybrid power system for an autonomous building as well as a comparison of two energy management strategies (EMS) are presented. A dynamic precise model of each key element of the whole system is addressed. Each model is structured using the Energetic Macroscopic Representation (EMR) in a model-oriented control approach. A model-based simplification using quasi-static approach (Lookup Tables) is proposed to accelerate the simulation of the whole system while keeping enough level of details for the energy variables under management. This model-based simplification is validated through simulations while the saving time varies from 10 to 300 times to the required by the complex sub-systems including their control loops. Eventually, the electrical global model of the whole system is presented and simulated for a specific case study. A simple energy management strategy is developed using a combination of rule-based management and filtering. This strategy is compared to an advanced EMS that uses Fuzzy Logic Controllers (FLC) to better manage the energy flows. Results highlight an important simulation time saving and demonstrate the primary importance of the EMS for the proper operation of the whole complex system.



### 3.3 Introduction

In recent years, the increasing difficulty to exploit oil deposits, coupled with the booming development of the renewable energies put these latter at a cost historically low [30], [67]. In this way, some authors suggest that we are at the very beginning of a new energy paradigm. For instance, the installation price of a photovoltaic system decreased from around 12\$/Wp in 1998 to around 4\$/Wp in 2014 [4], [31]. In Canada, more than 200 000 people live in remote areas without access to the electric grid of the country. About 75% of their electricity is thus coming from power plants using fossil fuels that have to be forwarded to these locations [68]. Thus, the awareness of climate issues could lead to the development of new kind of buildings that are less energy-consuming, and even autonomous for these locations.

PV energy cannot ensure on its own the total energetic demand of a stand-alone building and has thus to be associated to a proper energy management system because of its intermittent nature. To face the fluctuation of the solar inputs of energy, the seasonal and daily variation of the load, different storage systems are required. On the one hand, power-oriented storage devices like flywheels or supercapacitors are required to ensure the supply of energy regardless the variation of the load, on a very short time scale (several seconds up to several minutes). On the other hand, capacity-oriented storage devices like Li-ion batteries and hydrogen tanks are mandatory to face the daily and seasonal fluctuation of the solar inputs and load variations [69]. The first devices are located towards the high-power density devices in the Ragone diagram, whereas the storage devices are classified as high energy density devices [70]. The respective purposes of these two kinds of devices are thus totally complementary in power and energy management point of view.

A proper sizing of such kind of installation is thus mandatory, mainly for its energetic component, as the whole system should work safely and reliably all the time [35]. However, as studies have already been done and presented for sizing and because this topic is largely documented ([39],[36],[71]), for the sake of objectivity we suppose that the whole system is already sized in order to focus on the development of real-time Energy Management Strategies (EMS).

As many authors suggest at the same time a proper sizing of the installation as well as EMS for the whole systems, the resulting EMS presented can be quite simple because it is not the main focus of the presented work, practically resulting in EMS based on simple rules or operation modes [72],[73]. Moreover, because of the non-linear property of some subsystems -like PV system or fuel cell- some other works focus on a proper control scheme using for instance Model Predictive Control to optimize the control itself [74]. However, for the case of an autonomous building, the EMS itself that manages the energy flows between the different subsystems is of paramount importance, as it is often pointed out [67],[75]. This can be explained by the highly different features of the subsystems, in terms of response time or average efficiency.

In this study, the main objective is to develop an improved EMS, by using an especially designed global model. A control-oriented modelling is used to represent the behavior of each subsystem and a global model is presented and structured using the Energetic Macroscopic Representation (EMR) [76]. As the resulting system becomes quickly cumbersome, a systematic simplification methodology using quasi-static model (implemented by lookup tables) is presented and validated through simulations. With the whole quasi-static model presented, two EMS are then studied and compared: a first EMS is developed using simple rules and filtering to simply manage the energy flow. Thereafter, it is compared to an improved EMS which is based on Fuzzy Logic Controllers (FLC) to better manage the energy flow. Results highlight the benefit from using an improved EMS as well as the importance of the EMS itself in the proper operation mode.

This paper is organized as follows: Section 2 describes the configuration of the whole hybrid system under study and presents the general methodology used. Section 3 presents the detailed and simplified models of each key element (battery system, electrolyzer system, PV system, etc.) and validates the simplification through simulations. Section 4 describes the two EMS developed and compare them through simulations. Finally, Section 5 addresses conclusions and future work.

## 3.4 Methodology proposed

### 3.4.1 Hybrid system configuration

The whole system under study is described in Figure 3.1. The total load of the building is set as a reference power that needs to be satisfied. The only external input of energy comes from the PV system. The battery system is sized to perform a full cycle at the scale of a day. It is of paramount importance as it can store the energy coming from the PV system and redistribute it latter when the demand is high (end of day or night) at a high efficiency rate. A supercapacitor system that has a high-power density and a very fast response time is chosen to ensure the instantaneous fluctuation of the reference power. Eventually, a long-term storage system composed of  $H_2$ -tanks, an electrolyser and a PEM fuel cell, allows the long-term storage of energy needed to overcome the seasonal variation of the PV input and the total demand (mainly thermal) of the building.

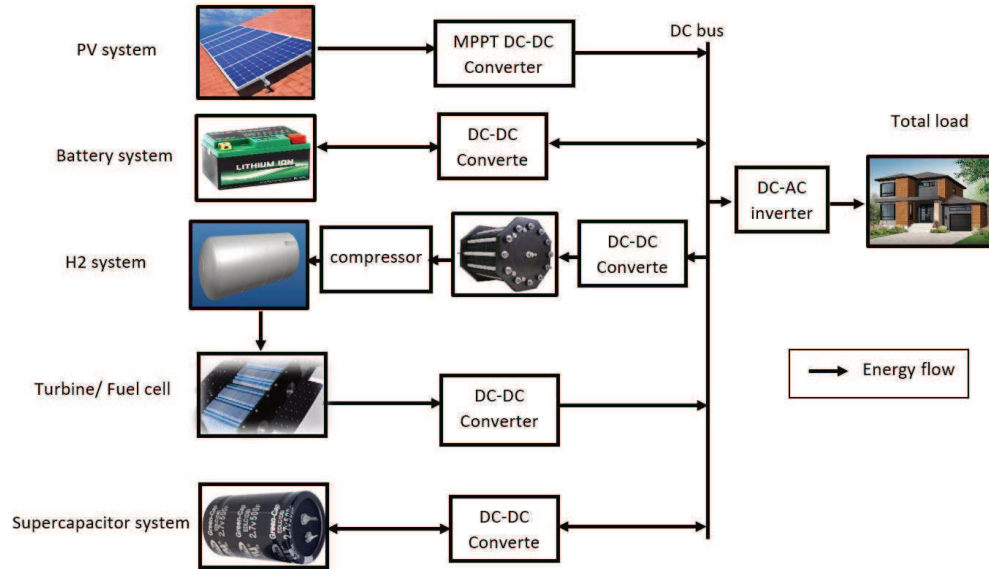


Figure 3.1 : Schematic diagram of the stand-alone hybrid system

All the dynamics of the different elements must be taken into account in the model step. Moreover, a control-oriented modelling is chosen to properly represent the whole system. The whole model is thus structured using EMR as presented in the next section.

### 3.4.2 Methodology using Energetic Macroscopic Representation

The EMR approach follows general principles to structure a model in a systematic way: using EMR, all the different subsystems of the whole system are studied together considering the different interactions between them, rather than studying and modelling them separately. It has been introduced in the 2000s and is more and more used nowadays [76], [60]. The strength of this representation is to naturally decompose a complex system into smaller and simpler parts, as well as to respect the causality of the different state variables. Moreover, a control scheme

can be deduced easily using inversion-based rules in a systematic way. Many articles nowadays present models for complex systems using EMR [76],[77].

As EMR is a powerful tool to structure models, this work presents a global modelling of the autonomous building structured in that way. Some pictograms are used here to represent key elements like source of energy, mono- or multi-physical domain converters or energy accumulation elements . The main pictograms are presented in appendix.

The whole stand-alone system is composed of several key elements. Each of them is modelled using this EMR approach. Then, each model is reduced into a quasi-static model to simplify the global electrical model of the building. Some works has already been proposed for the reduction modelling of complex systems. For instance, Silva *et al.* proposes different levels of modelling of a constant voltage source based on different coupling of batteries and supercapacitors (SC) [43]. In [78], the authors also propose two levels of modelling of a traction drive, resulting in a dynamic model and a static one. Here, the methodology proposed is inspired by these works to simplify the proposed autonomous house complex system. To do so, each system is simulated separately using full dynamical model through Matlab/Simulink™ and lookup tables are deduced from these simulations. Then, parallel simulations of both (full dynamic and reduced quasi-static models) are performed for each subsystem to validate the proposed simplification approach. Once it has been done for every system, the modelling of the whole autonomous building is deduced by merging all the subsystems. This approach is quite general and made it possible to obtain a global model in a systematic way. Furthermore, the simplification steps for each subsystem allows to finally get a faithful representation of a complex system while maintaining the possibility to simulate it in a reasonable time: around 10 minutes instead of 3 weeks of simulation.

### 3.5 Modelling of the hybrid system

The sizing of the whole system has already been done for a specific case study in a previous work [79]. This resulting sizing has conducted to the main features of the different elements presented in the table below for an autonomous house in Cairo, Egypt.

Tableau 3.1 : Main features of each subsystem

Subsystem	Main features
Battery system	4 batteries in parallel (one battery: 24 V, 360 Ah, 4 mΩ and voltage slope $\delta=0.05V/\%$ )
Photovoltaic system	54 arrays in parallel (250 Wp each)
Electrolyser	Rated power: 5kW
$H_2$ -tanks	5 tanks (one tank: 850 L, 80kWh, 60 bars max)
PEM Fuel cell	Rated power: 1.85kW

Thus, the models presented are realized while respecting these features.

### 3.5.1 Modelling of the Battery system: simplification and validation

Many articles propose various ways to model batteries with different levels of accuracy. As this study does not try to describe and analyse in details any specific system, we used here a first order model of the battery pack, as it is presented in [60]. The batteries are connected to a DC-DC converter that is itself connected to the DC bus of the building. A control scheme is directly deduced from the EMR model of the model by inversion, resulting in the structure presented in Figure 3.2:

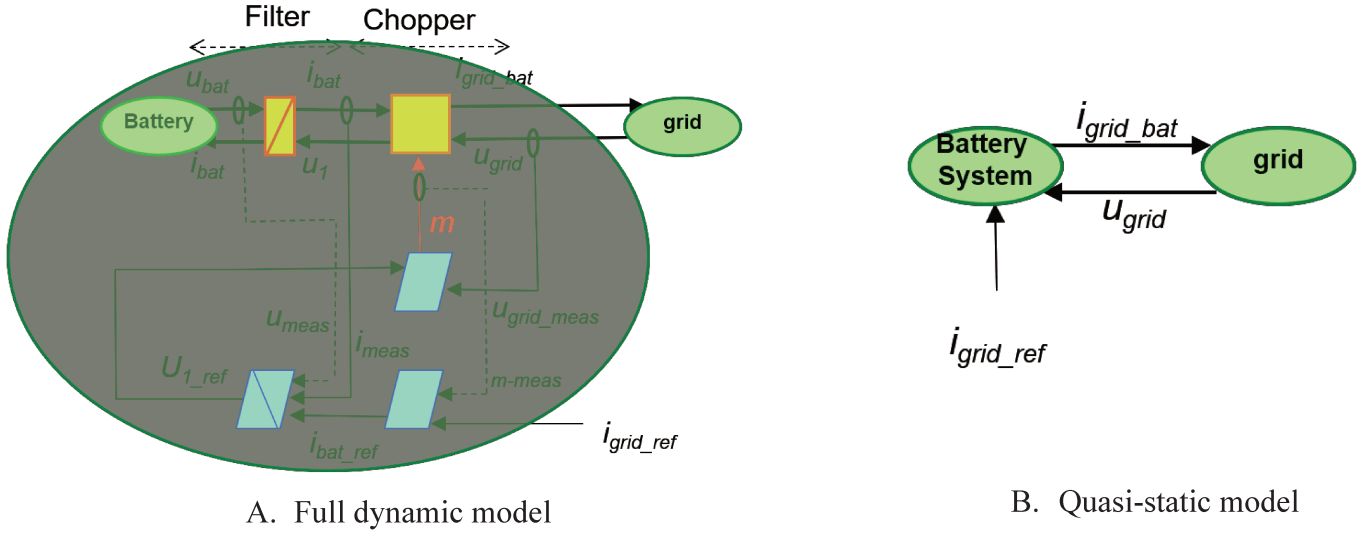
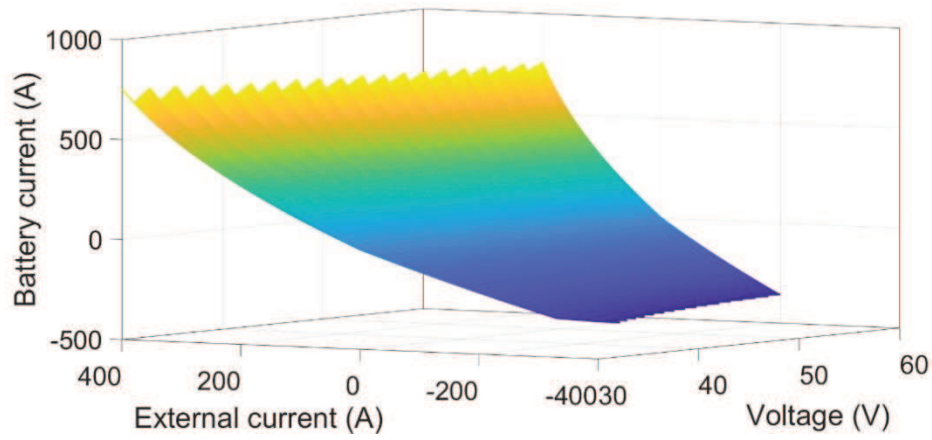
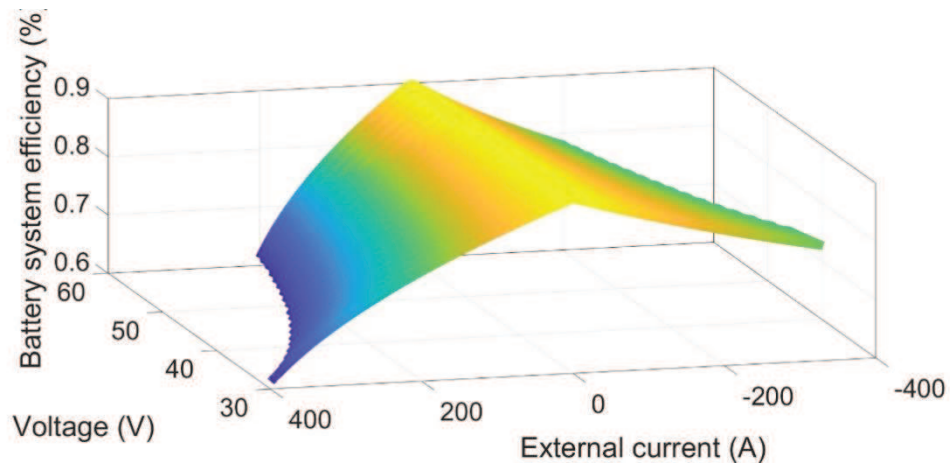


Figure 3.2 : EMR Full dynamic and quasi-static of the whole battery system

The total model of the battery system is then simulated separately to generate look up tables. As this model will then be used to study EMS for an autonomous building, the look up tables are generated to properly estimate the global efficiency of the system (Figure 3.3), as well as the current flowing through the batteries. Indeed, this latter is necessary to correctly evaluate the variation of the State of Charge (SoC) of the batteries for the global system simulation process.



A. Battery current look up table



B. Battery system efficiency look up table

Figure 3.3 : Look up tables generated for the battery system

To validate the simplified model, a simulation has been done that computes at the same time the full dynamic model and the simplified one and the evaluation of the SoC of the batteries was compared between the two simulations. Results are presented in Figure 3.4.

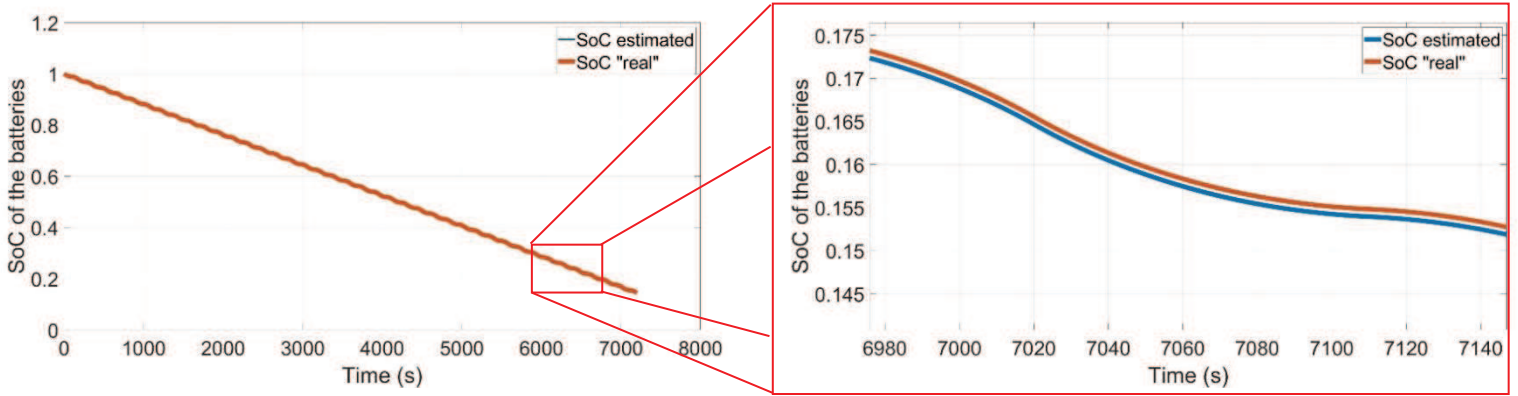


Figure 3.4 : Validation of the simplified model for the whole battery system

For these two hours of simulation, the final relative gap remains below 0.6% between the two model simulated, which validates the proposed approach. The quasi-static model is about 8.2 times faster comparatively to the the full dynamic model. However, the purpose is obviously not the same and the simplified one only gives us proper information for only the variables of interests: efficiency and SoC.

### 3.5.2 Modelling of the PV system

Similarly, to the battery system, the modelling of the PV system is structured using EMR. Some authors have already proposed an EMR model of a PV system connected to a battery [80]. This model is adapted and used here. The whole PV system is then simulated separately using a full dynamic model in order to generate look up tables and then simplify the model for long-term purpose. The focus here is to determine the output current produced by the PV system, as a function of the global irradiance that is received and the DC voltage of the local DC bus of the autonomous house. The look up table generated is presented in Figure 3.5.

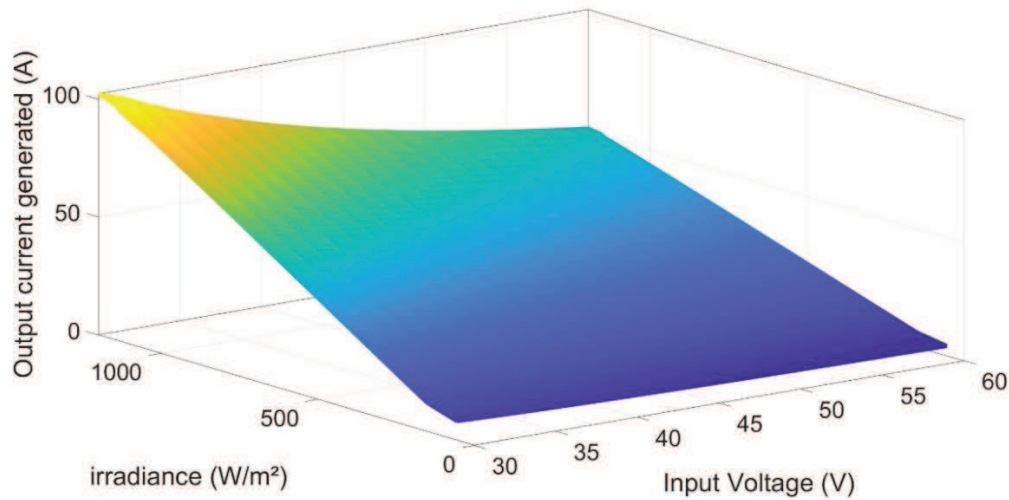


Figure 3.5 : Look up table of the output current produce by the PV system

Once more, a simulation has been done to evaluate the accuracy of the static model. This simulation runs at the same time the full dynamic and static model, and the evaluation of the total capacity of electricity produced (in Ah) was compared between the two models (Figure 3.6). A static model appears adequate, as the response time of the PV system is very short ( $\tau < 1ms$ ). As the full dynamic model is a little bit complex and uses MPPT strategies that are time consuming, the time saving is impressively higher, resulting in a simulation about 293 times faster when a static model is used. Once, the static model only provides the efficiency and the current outputs.

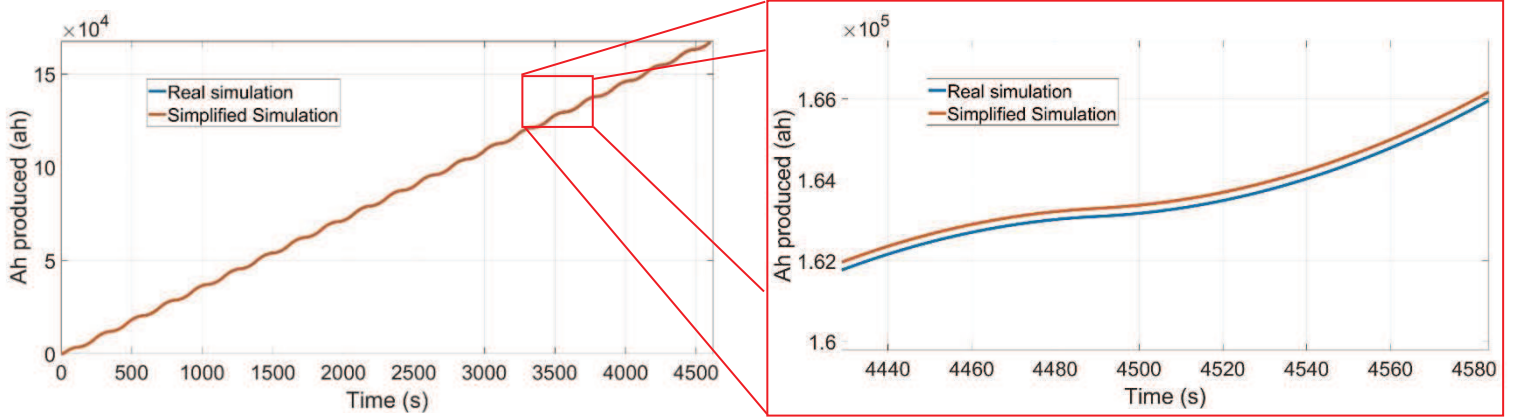


Figure 3.6 : Validation of the simplified model for the whole PV system

For 1.25 hour of simulation, the final relative gap remains below 0.3% in term of total capacity of electricity produced between full dynamic and static model.

### 3.5.3 Modelling of the electrolyzer system

The electrolyzer system is more complex and we should consider its whole surrounding environment including the connexion with the local DC bus and the its interaction with the  $H_2$ -tanks through a compressor. Some control-oriented modelling of such a system has already been done (see [81]) and the model presented here is an adaptation and structuration in EMR of the one presented by Tao Zhou Rule-Based.in [58]. The global EMR model of the electrolyser system is presented Figure 3.7. Note that the “grid” refers here to the local small grid of the house rather than the traditional grid of a country or a region. Efficiencies are considered in the chopper, the inductance, the capacitor and the compressor, as well as in the electrolyser itself.



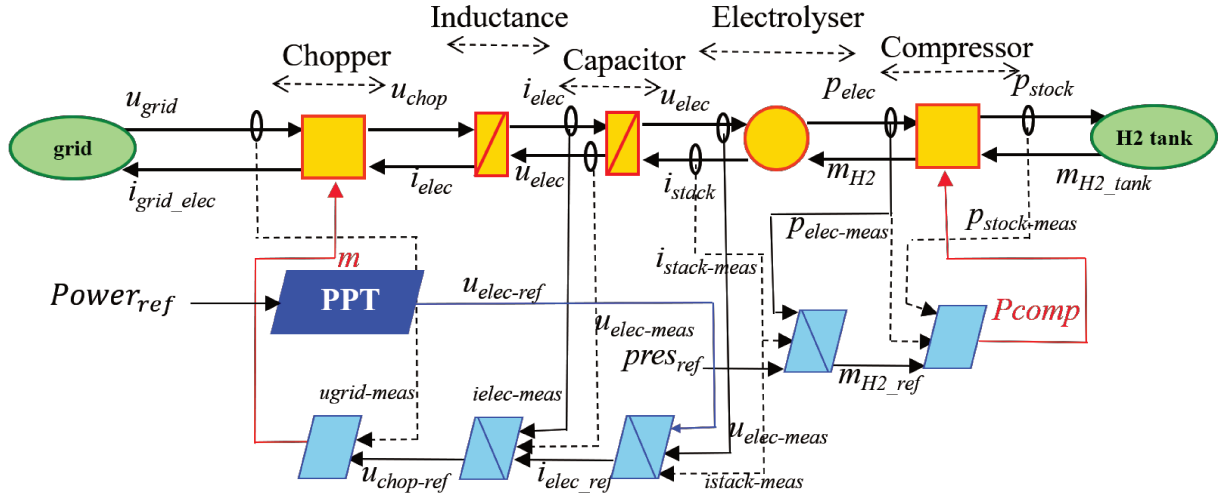
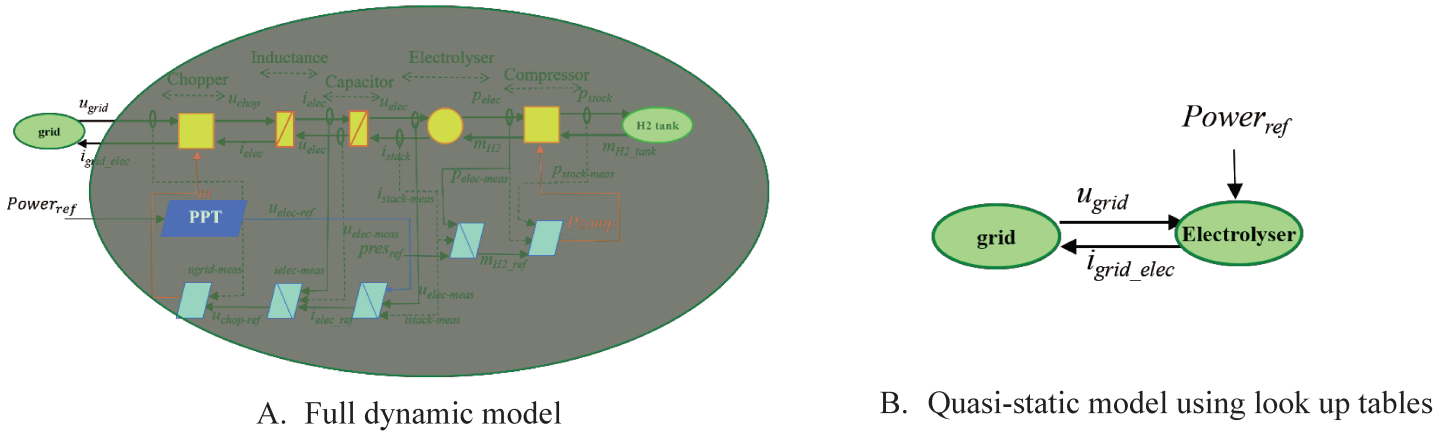


Figure 3.7 : EMR full dynamic model of the electrolyzer

A comparison of the complex and simplified models is presented in Figure 3.7:

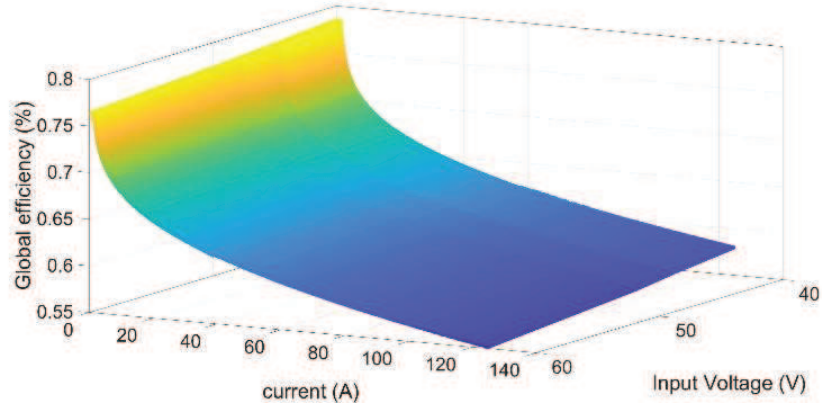


A. Full dynamic model

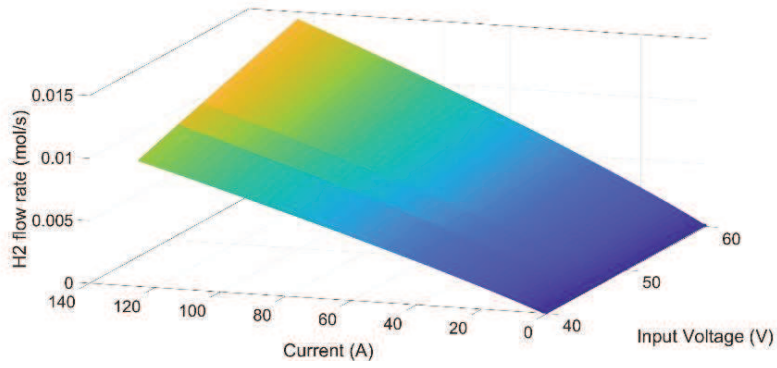
B. Quasi-static model using look up tables

Figure 3.8 : EMR Full dynamic and quasi-static model of the electrolyzer and its surrounding

In this case, to simplify the full dynamic model, two look-up tables are necessary: the  $H_2$  flow rate as a function of the requested current and voltage, and the global efficiency of the system as presented in Figure 3.8.



A. Electrolyzer global efficiency look up table



B.  $H_2$  flow rate look up table

Figure 3.9 : Look-up tables generated for the electrolyzer and its surrounding

The quasi-static model developed uses a response time  $\tau_{elec} = 5s$ , that is a characteristic response time for alkaline electrolyzers as proposed in [82]. Validation has been performed with a two hours simulation. Results are presented bellow and the final relative gap remains below 0.1% in term of total consumption of hydrogen. Here, the simplified model is computed about 48 times faster than the whole complex model.

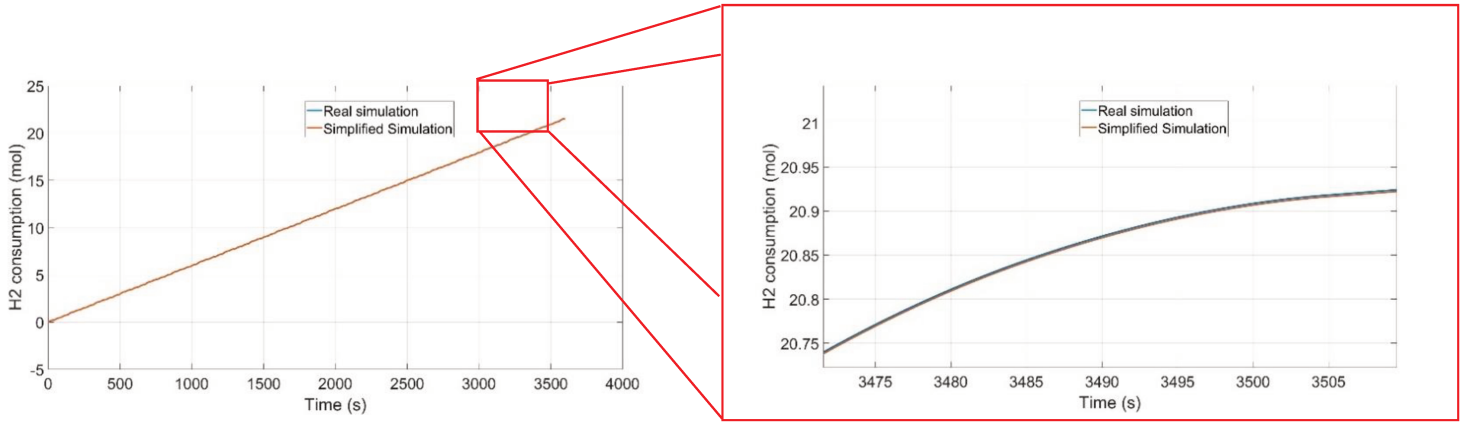


Figure 3.10 : Validation of the simplified modelling of the electrolyzer

### 3.5.4 Modelling of the PEM Fuel Cell system

In recent year, many works have been done to model different kinds of fuel cells [83], [84]. Here, the model used is based on the work of Olivier Tremblay *et al.* that is adapted and structured with the EMR formalism [85]. Figure 3.10 presents the global EMR model used to represent a PEM Fuel Cell and its surrounding environment.

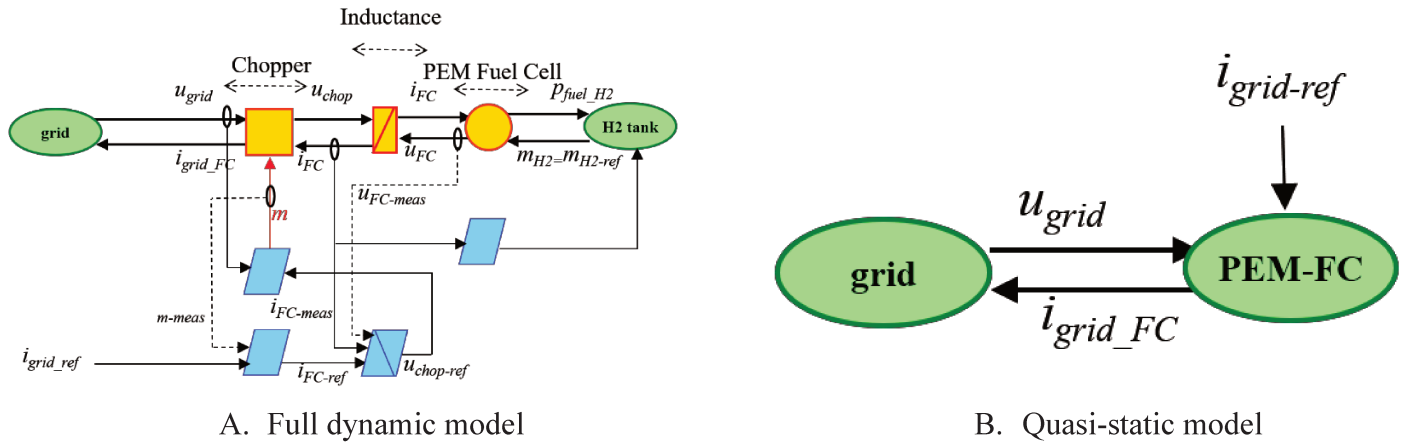
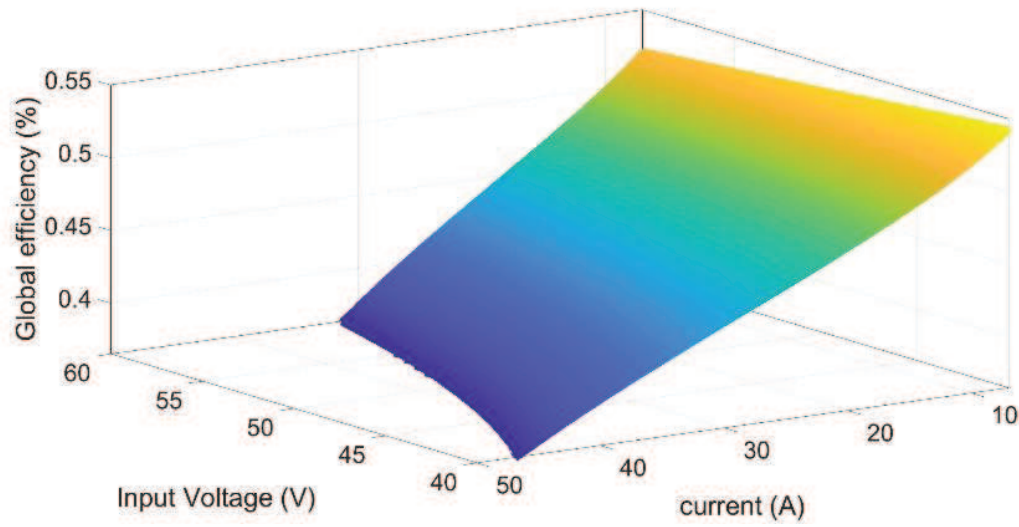
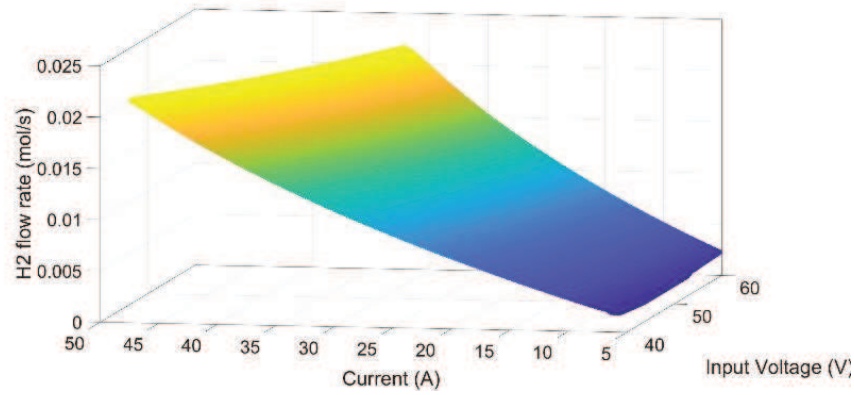


Figure 3.11 : EMR full dynamic and quasi-static model of a PEM Fuel Cell and its direct surrounding

For this system, the focus is to preserve a certain accuracy in terms of global efficiency and  $H_2$  consumption. Indeed, the accurate evaluation of these two parameters is enough to globally evaluate the performance of the EMS for the whole autonomous building. Two look-up tables for these two parameters are established as a function of the DC bus voltage and the reference current. Results are presented in Figure 3.11.



A. PEMFC global efficiency look up table



B.  $H_2$  flow rate look up table

Figure 3.12 : Look up tables generated for the PEM Fuel Cell system

The quasi-static model developed for the PEM Fuel Cell uses a response time  $\tau_{PEM\_FC} = 0.1s$ . This time depends on the fuel cell stack itself and is thus subject to small variation [85]. Once more, validation of the quasi-static model was performed by comparison between both, which conducts to the results presented in Figure 3.13:

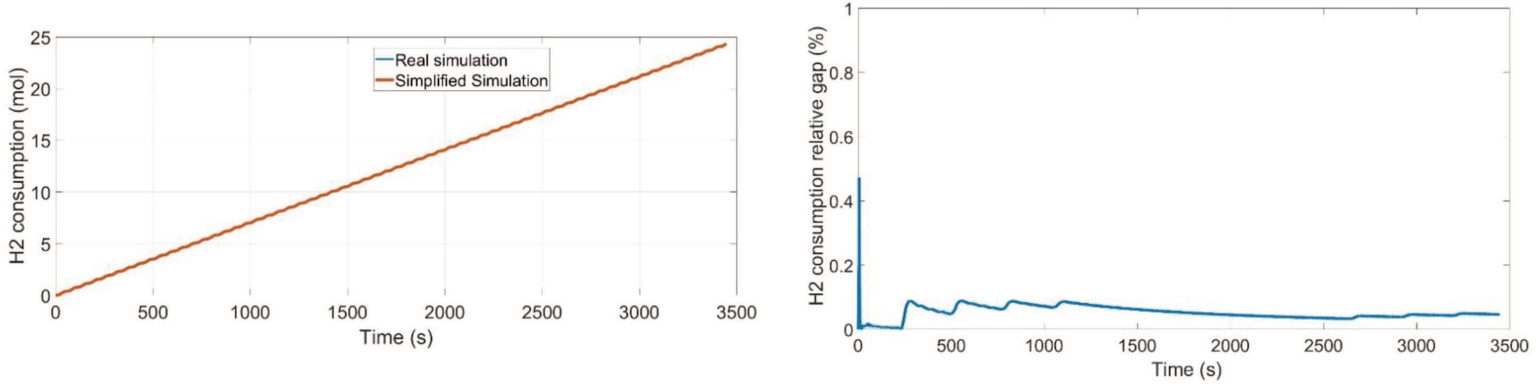


Figure 3.13 : Validation of the simplified Fuel Cell model

Once more, the results highlight the accuracy of the look up tables to evaluate the variables of interest: it is not necessary to simulate the whole complex system, that is highly time-consuming. As the focus is to develop a global model of the stand-alone building and to evaluate the performance of different EMS, these simplified models appear enough to properly evaluate the different efficiencies and battery and the  $H_2$ -tanks SoC. This simplified model is about 20 times faster than the global complex model of the fuel cell.

### 3.5.5 Modelling of the Supercapacitor system

Modelling of the supercapacitor (SC) with his dynamic is well-known nowadays [84]. The reduced model used here has already been validated in [86]. Thus, only the main EMR model is presented in Figure 3.14.

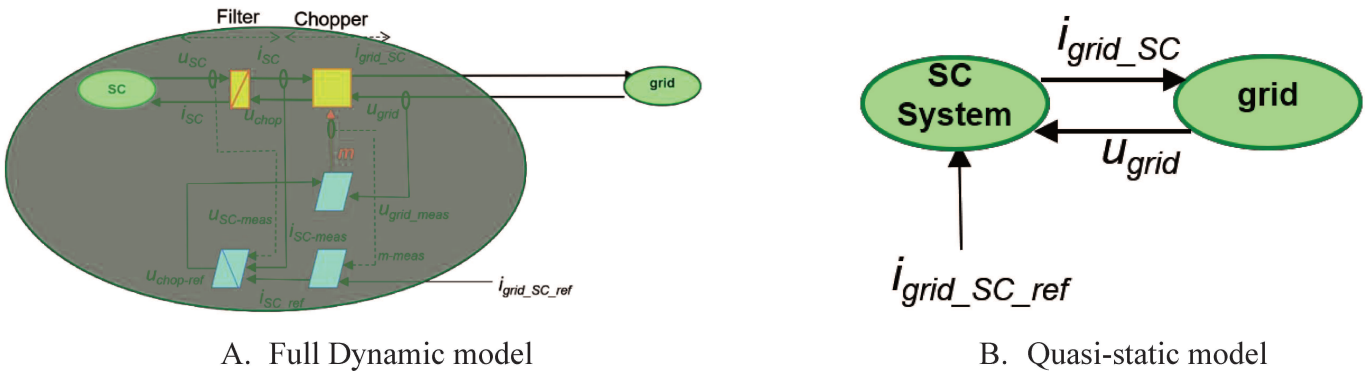


Figure 3.14 : EMR models of the supercapacitor system

## 3.6 Energy Management Strategies for an Autonomous Building

### 3.6.1 Modelling of the whole Autonomous Building

The whole electrical model of the autonomous building can then be deduced by merging all the different models of its key elements, resulting in the EMR structure presented in Figure 3.15. The electrical load is considered as a simple power reference; thus, the dynamic of the inverter is not represented. A simple PID controller regulates the DC voltage of the house and provides a reference current to the EMS. The EMS then split that reference current to provide reference currents for all the different subsystems to control accurately the DC bus voltage.

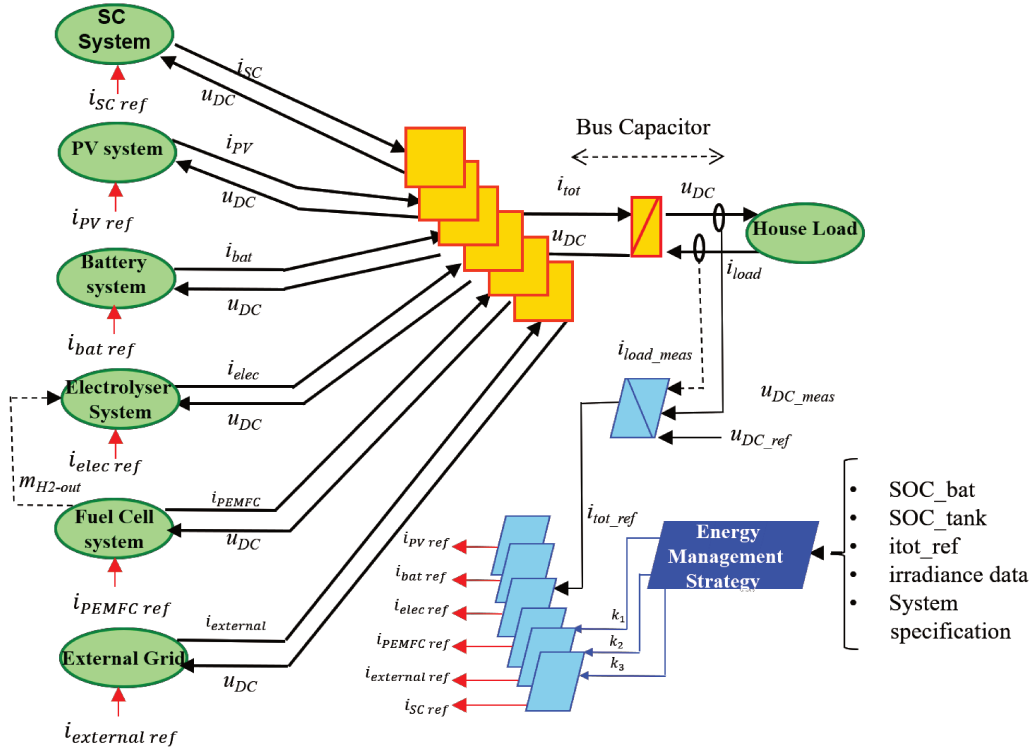


Figure 3.15 : Global EMR of the whole Autonomous Building

When the system is not able to respond to the building request, an external current is used to allow the simulation to continue. This represents an external grid (or an emergency power system) that could supply the building but has to be minimized by the developed EMS.

### **3.6.2 Development of Energy Management Strategies**

The model presented above is very suitable for the development of EMS, that can then be used in real-time for such an autonomous building. Indeed, the variables of interest are well estimated but in a very short time. Thus, several weeks of simulation can then be performed in few minutes with the same computer (Intel Core i7-7700HQ CPU @2.80GHz). By nature, this kind of EMS is quite complex as it must distribute a reference current between batteries, SC, electrolyser and fuel cell. Two EMS have been implemented and compared: rule- and Fuzzy Logic Controller-based EMS.

#### **3.6.2.1 Double layer Rule-Based EMS**

The methodology used for the Rule-based EMS is to realize a management in two layers. The upper strategy layer (USL) defines operating mode using simple control states as presented in Figure 3.16. The lower strategy layer (LSL) is a control layer which reduces the constraints for the subsystems by filtering the controlled variables. The whole resulting EMS is presented in Figure 3.17.

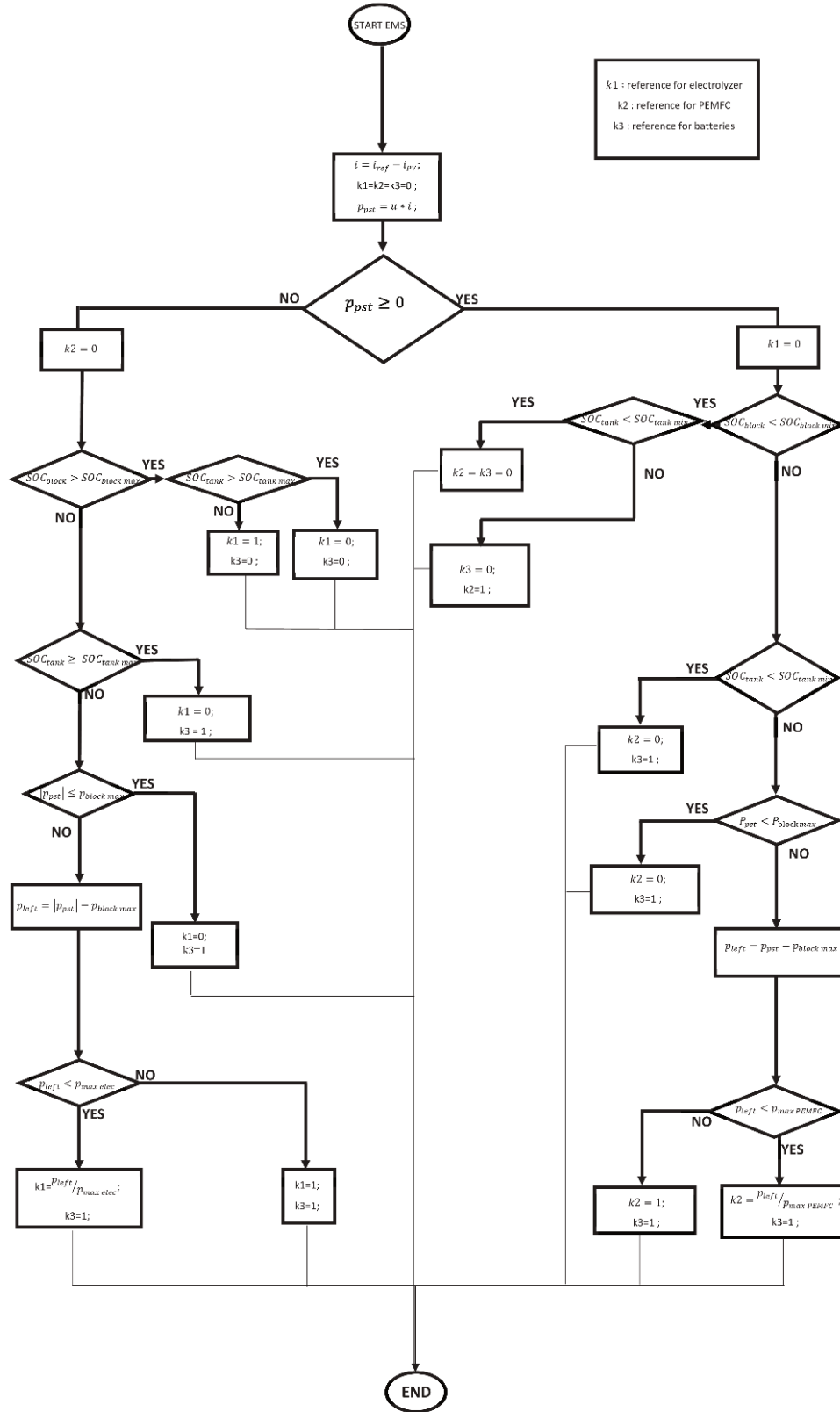


Figure 3.16 : Flow chart for Upper Strategy Layer of rule-based EMS



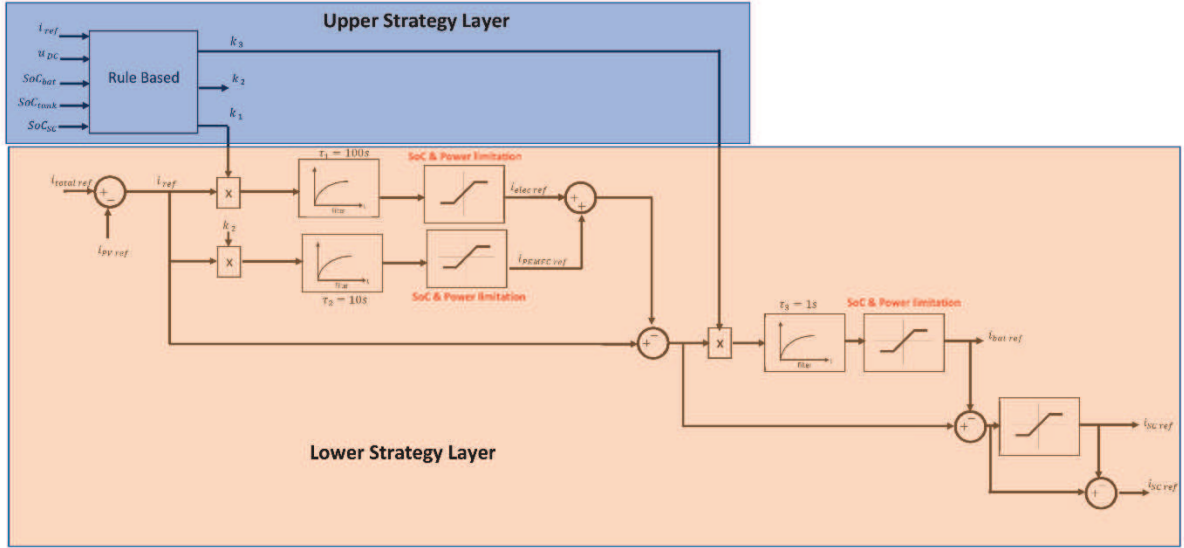


Figure 3.17 : Overview of the rule-based EMS scheme

### 3.6.2.2 Improved EMS using Fuzzy Logic Controller

The proposed improved EMS uses Fuzzy Logic Controllers (FLC) as a scheme to better manage the energy flow between the different subsystems. Many kinds of computing-based techniques allow to solve complex problems that cannot be solved in a straightforward way [87]. Among these techniques, there are dynamic programming, model predictive control [74], neural networks, FLCs [26] or meta-heuristics [27].

An EMS using FLCs is used here due to its robustness, simplicity and already validated in previous works [88]. Indeed, many works have already presented the benefits of the FLC in this kind of application [89] [90]. This approach is very suitable when the human language can describe the problem or when the problem is very complex, or the variables are unstable: this is precisely the situation in this application. Moreover, it is a very effective method when the purpose is to use it for power management in real-time and it is also globally appreciated by the industry.

The main drawback of the FLC approach is the computational time needed to process the fuzzification and defuzzification. It is however possible to circumvent this problem by generating global look up tables once the whole FLC is designed.

Here, we keep the same EMS architecture as the one presented for rule-based EMS where three parameters are used to manage the energy flow (see Figure 3.18). Two FLC regulate the energy flowing through the electrolyser and the PEMFC by acting as dynamic power limiters. A third FLC ensures the split of power between the batteries and SCs.

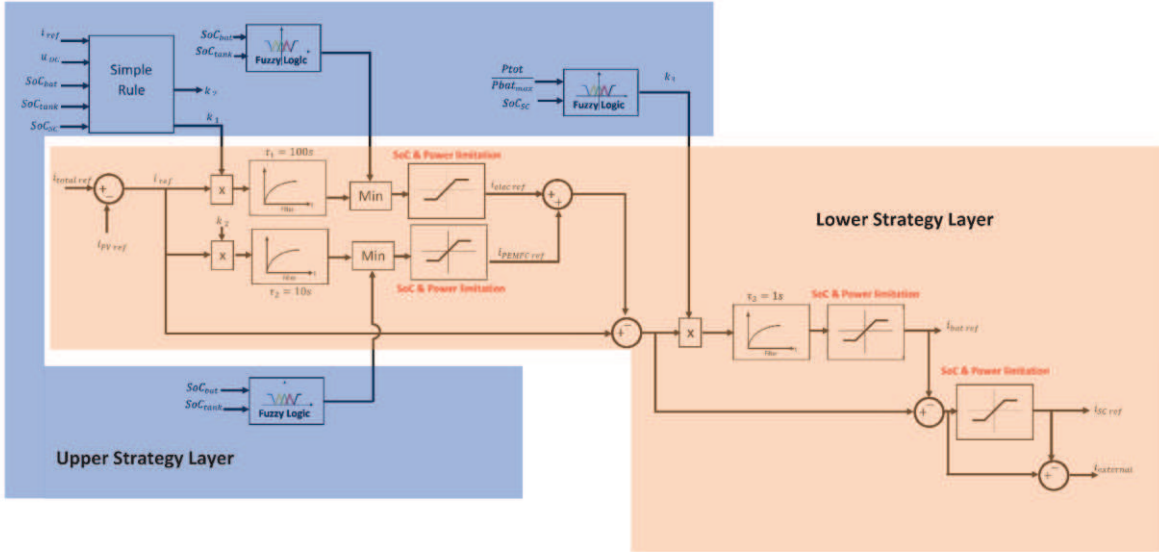


Figure 3.18 : Overview of the improved EMS using FLC

### 3.6.2.2.1 FLC for the Electrolyser system

To dynamically limit the reference power for the electrolyser, two parameters are considered: the State of Charge of the batteries (SoC-bat) and the SoC of the hydrogen tanks (SoC-tanks). They represent the first two groups of membership functions. The last group of membership function defines the power limitation, which is the output group. The general idea of that FLC is to limit the power allowed when SoC-bat is low, in order to maximize the global efficiency of the system. Moreover, when SoC-bat increases (and ultimately when batteries are full), the power allowed to the electrolyser is increasing, in order to avoid a loss of energy due to a potential limitation of the rated power of the electrolyser (much more above the one of the batteries). Finally, the FLC should also improve the security of the system by assuring that the SoC-tanks never reaches its maximum level. Regarding the first input, 7 memberships functions are defined:

- For values of SoC-bat below 0, the used membership function is defined as “Null”
- For  $0 \leq SoC\text{-}bat \leq 0.5$ , the membership function is defined as “Low”
- For  $0.45 \leq SoC\text{-}bat \leq 0.6$ , the membership function is defined as “Medium”
- For  $0.55 \leq SoC\text{-}bat \leq 0.75$ , the membership function is defined as “Good”
- For  $0.7 \leq SoC\text{-}bat \leq 0.85$ , the membership function is defined as “Very Good”
- For  $0.8 \leq SoC\text{-}bat \leq 1$ , the membership function is defined as “Excellent”

- For  $1 \leq SoC\text{-}bat$ , the membership function is defined as “Maximum”

Regarding the second input, 6 memberships functions are defined:

- For values of  $SoC\text{-}tanks$  below 0, the used membership function is defined as “Null”
- For  $0 \leq SoC\text{-}tanks \leq 0.2$ , the membership function is defined as “Low”
- For  $0.15 \leq SoC\text{-}tanks \leq 0.4$ , the membership function is defined as “Medium”
- For  $0.35 \leq SoC\text{-}tanks \leq 0.6$ , the membership function is defined as “Good”
- For  $0.55 \leq SoC\text{-}tanks \leq 0.8$ , the membership function is defined as “Very Good”
- For  $0.75 \leq SoC\text{-}tanks \leq 1$ , the membership function is defined as “Excellent”
- For  $1 \leq SoC\text{-}tanks$ , the membership function is defined as “Maximum”

Eventually, 7 memberships functions are also defined for the output power limitation:

- The used membership function defined as “Null” provides  $0 \leq P_{elec} \leq 290\text{ W}$  ( $= P_{min\text{ elec}}$ )
- The used membership function defined as “Very Low” provides  $290 \leq P_{elec} \leq 1100\text{ W}$
- The used membership function defined as “Low” provides  $1000 \leq P_{elec} \leq 2000\text{ W}$
- The used membership function defined as “Medium” provides  $1500 \leq P_{elec} \leq 3000\text{ W}$
- The used membership function defined as “High” provides  $2500 \leq P_{elec} \leq 4000\text{ W}$
- The used membership function defined as “Very High” provides  $3500 \leq P_{elec} \leq 5000\text{ W}$
- The used membership function defined as “Maximum” provides  $4500 \leq P_{elec} \leq 5000\text{ W}$

The 3D map following the main explained rules of limitation is presented in Figure 3.19.

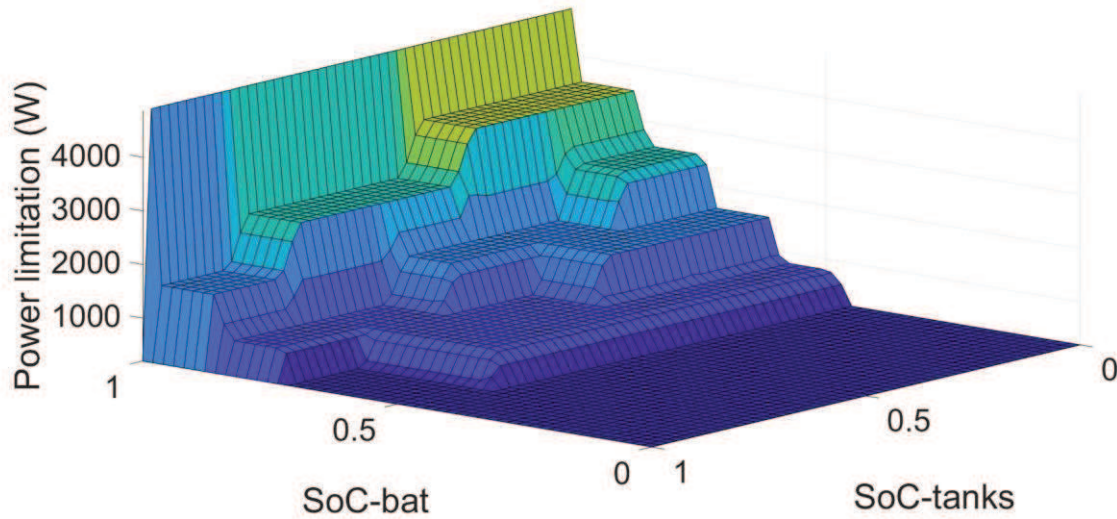


Figure 3.19 : Look up Table generated for the dynamic Power limitation of the electrolyser

### 3.6.2.2.2 FLC for the PEMFC system

As it has been realised for the electrolyser, a dynamic FLC limitation is also implemented to limit the power requested to the PEMFC. However, the general rules are there different. The main idea is to assist the batteries assuming that the tanks are not totally empty. As the SoC-bat is decreasing, the power limitation for the PEMFC is increasing, until it reaches the maximum power of the PEMFC. Moreover, as the tanks are discharging, the limited power becomes lower and lower to prevent from a full discharge of the tanks. Thus, two groups of memberships functions represent the SoC-bat and the SoC-tanks. For each group, the same seven names are given to characterize the different SoC, although the boundaries are changed. Finally, 7 layers of power are equally distributed from the minimum power to the maximum power of the PEMFC system. The resulting 3D FLC map is presented in Figure 3.20.

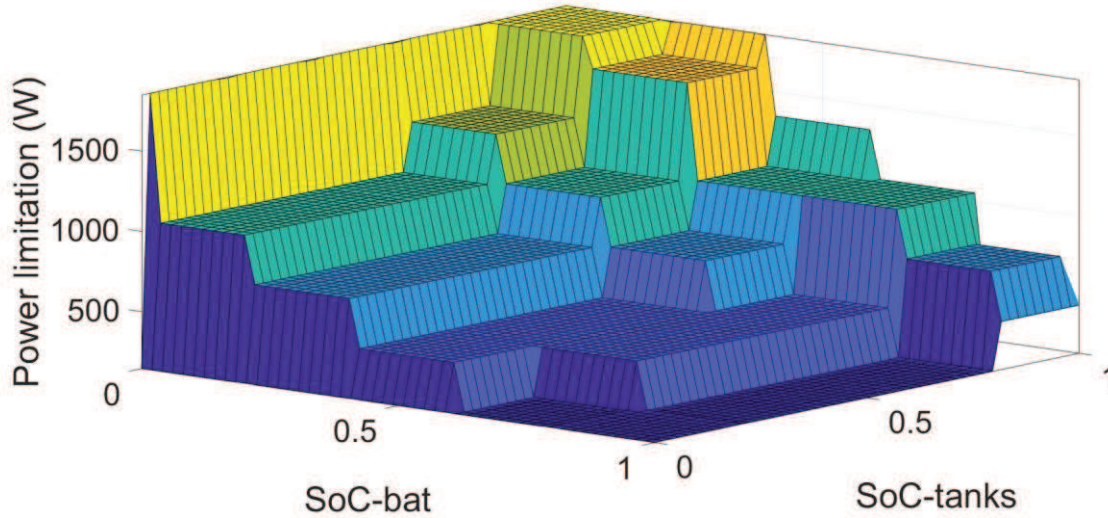


Figure 3.20 : 3D FLC map of dynamic power limitation for the PEMFC

### 3.6.2.2.3 FLC for the Energy Management between batteries and SCs

Concerning the energy management of the remaining power flow between the batteries and supercapacitors, a new parameter  $\delta$  is defined as follow:

$$\delta = \frac{P_{left}}{p_{bat\ max}} \quad (3.1)$$

A set of membership functions allows to represent the relative power requested to the batteries using  $\delta$  and the following range:

- If  $-0.1 \leq \delta \leq 0.1$ , the membership function is defined as “Around 0”
- If  $0.1 \leq \delta \leq 0.4$ , the membership function is defined as “Very low”
- If  $0.3 \leq \delta \leq 0.6$ , the membership function is defined as “Low”
- If  $0.5 \leq \delta \leq 0.85$ , the membership function is defined as “Normal”
- If  $0.8 \leq \delta \leq 1$ , the membership function is defined as “High”
- If  $1 \leq \delta$ , the membership function is defined as “Excess”
- If  $-0.4 \leq \delta \leq -0.1$ , the membership function is defined as “Very low inverse”
- If  $-0.6 \leq \delta \leq -0.3$ , the membership function is defined as “Low inverse”
- If  $-0.85 \leq \delta \leq -0.5$ , the membership function is defined as “Normal inverse”
- If  $-1 \leq \delta \leq -0.8$ , the membership function is defined as “High inverse”
- If  $\delta \leq -1$ , the membership function is defined as “Excess inverse”

A second group of membership function is related to the state of charge of the Supercapacitors (SoC-SCs) and is defined in the same way as the previous SoC-bat or SoC-tanks. Finally, the final output  $k3$  called “SC-contribution” is split into 6 membership functions defined bellow :

- “Alone” output membership is for  $-0 \leq k3 \leq 0.2$
- “More than Half” output membership is for  $0.2 \leq k3 \leq 0.5$
- “Half” output membership is for  $0.45 \leq k3 \leq 0.55$
- “Less than Half” output membership is for  $0.5 \leq k3 \leq 0.9$
- “Keep” output membership is for  $0.9 \leq k3 \leq 1.1$
- “Reverse” output membership is for  $1.1 \leq k3 \leq 1.5$

The main general rules are the following:

- If the request is to overclass the maximum power of the batteries, then SCs contribute more than batteries
- If SCs are discharged and the requested power is low, then batteries contribute more to reload the SCs
- If SCs are overcharged and the requested power is low, then batteries contribute less to discharge the SCs

These three main rules are established for requested power that is positive or negative (referred as “inverse” in the membership function). This conducts to the 3D FLC map of Figure 3.21:

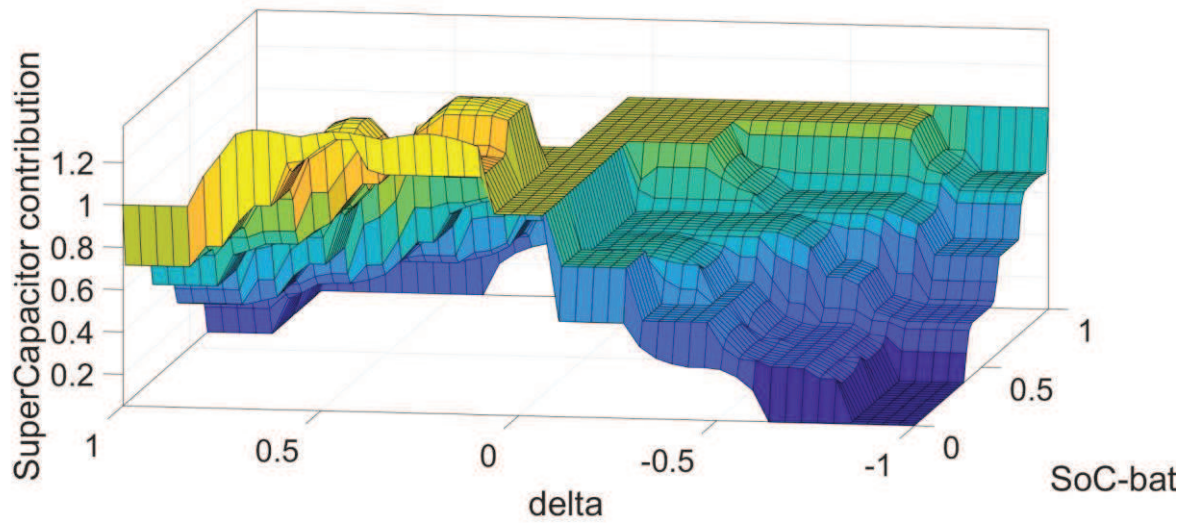
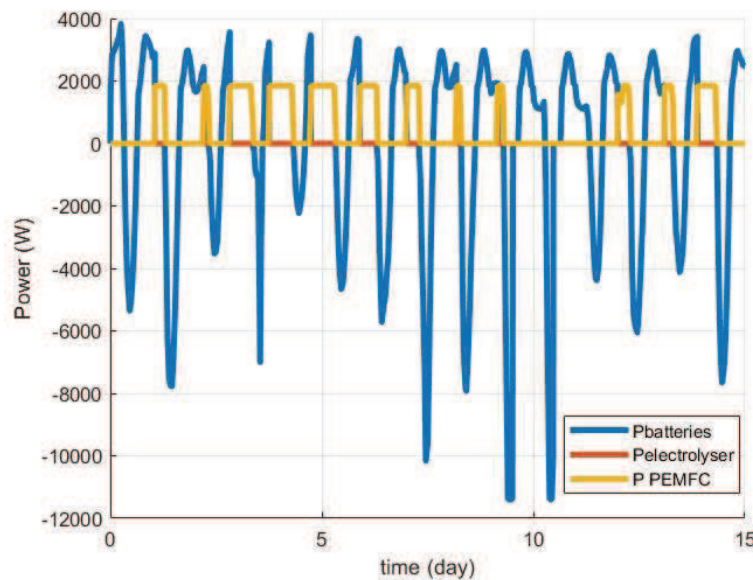


Figure 3.21 : : 3D FLC map of SC contribution

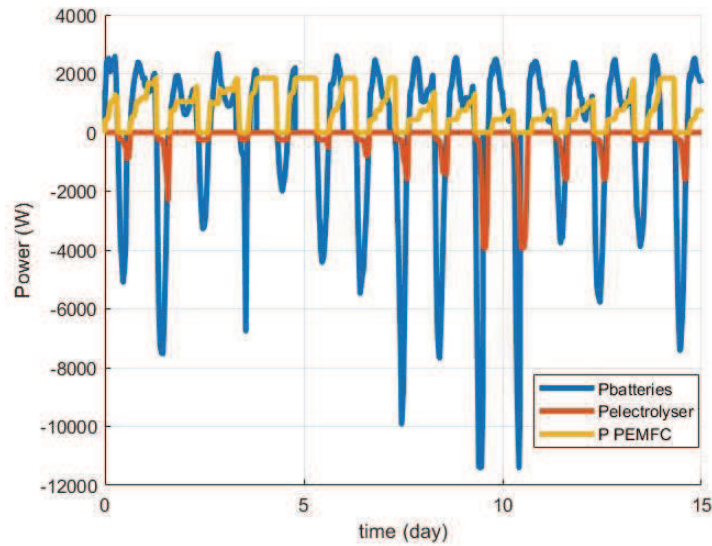
### 3.6.3 Results analysis and comparison of the proposed

For the case under study (Cairo, Egypt), two weeks of dynamic simulation was performed with the two proposed EMS. To better analyse the performance of these EMS, the simulation was performed in January, where the worst conditions occur (a low solar input of energy, and a high load of the building - essentially thermal -). At the beginning of the simulation, the tanks and batteries are supposed fully charged, and the SCs are supposed half-charged. The main results are presented in Figure 3.22.



A. Power generated by the main subsystems using the rule-based EMS





B. Power generated by the main subsystems using the FLC EMS

Figure 3.22 : Main Power Flow evolution using the two proposed EMS

It is to be noticed that the batteries have to be able to accept a high charging power no matter the strategy implemented, as the PV panels produce energy only during the sunny hours of the day. This is a consequence of the sizing of the whole system that aims to create a system able to respond to the demand of energy during all the year.

During the first days, when the PVs panels do not generate energy, the FLC EMS demands the PEMFC to assist the batteries. This results in an effective reduction of the batteries power that can extend its lifetime. However, as the tanks are discharging, the rated power requested to the PEMFC is also decreasing, in order to avoid a premature full discharge. On the opposite, the simple EMS realizes each day a full discharge of the batteries, and then a maximum power requested to the PEMFC. This results in a decreased efficiency during the whole period. The global SoC of the batteries and tanks are presented in Figure 3.23.

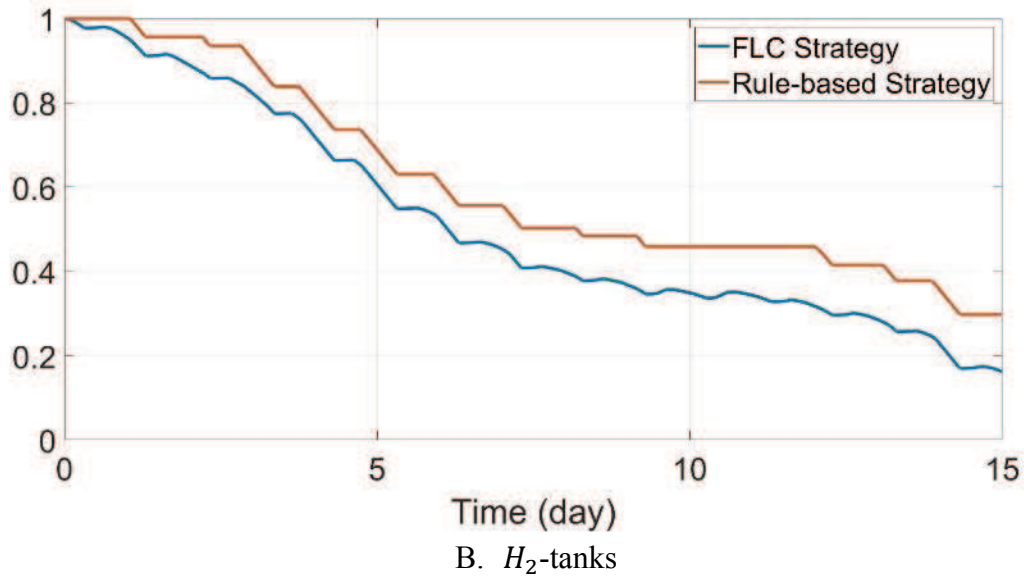
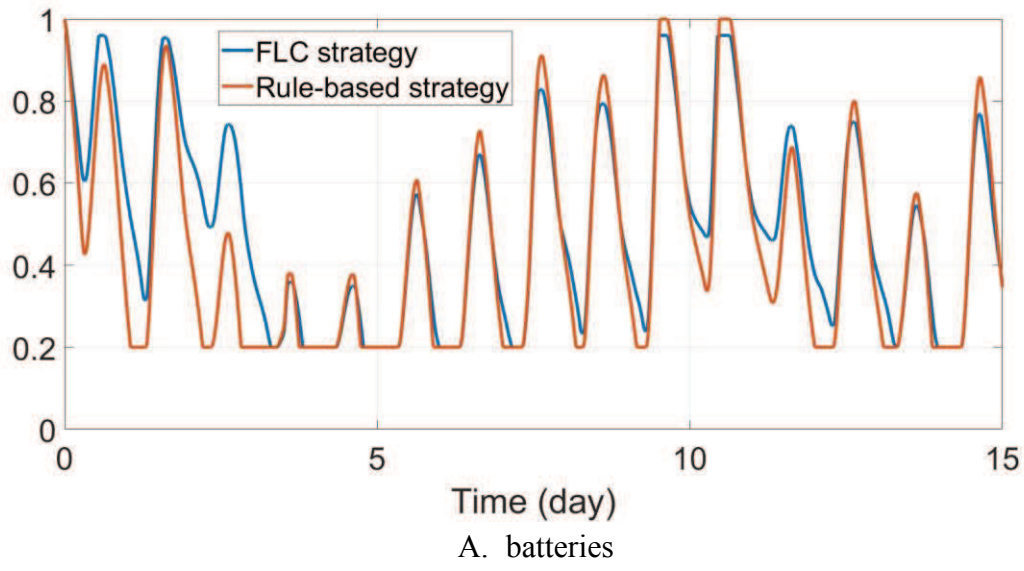
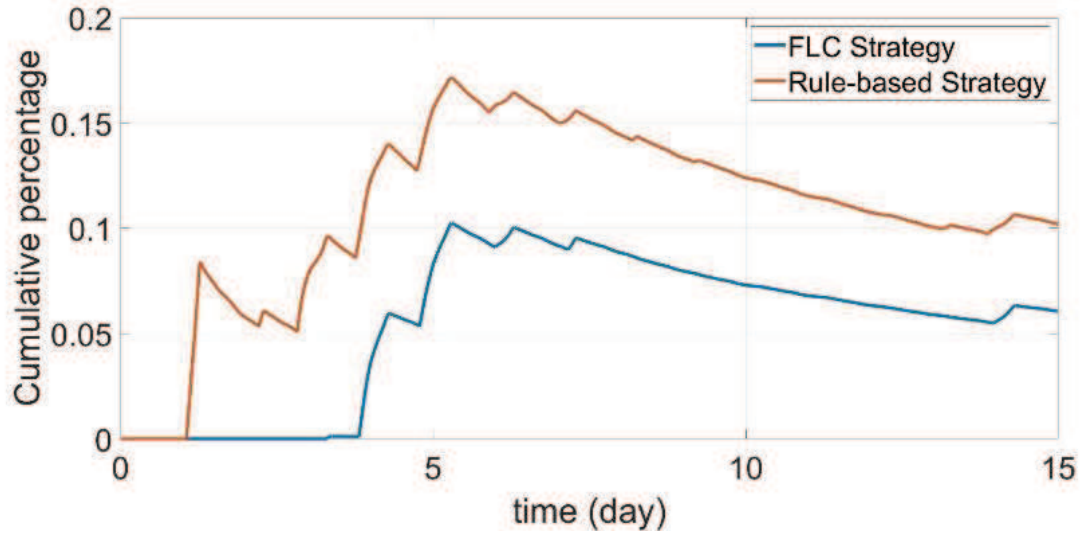


Figure 3.23 : SoC evolution of the batteries and  $H_2$ -tanks

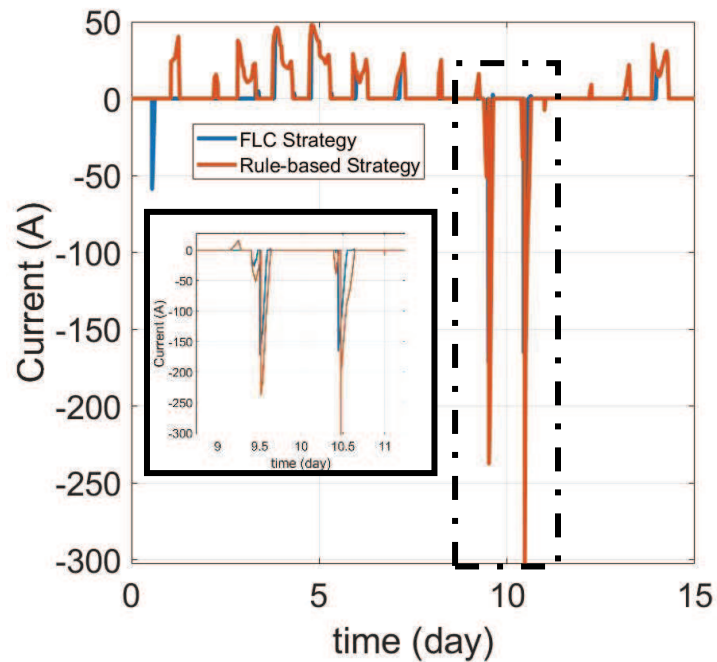
We can notice that the rule-based EMS fails to maintain the batteries within a functional range of SoC for the first days, resulting in a part of the day when the PEMFC should provide alone all the requested power. However, as its rated power is not enough, the result is an important external request of energy, that an external grid should provide to the building for its proper operation (see Table 2 for the defined rated powers). Moreover, it is to be noticed at the day 10 and 11 that the batteries become totally full for a certain period of time when regulated by rule-based EMS. We can guess that this result to a part of the time when the electrolyser will not be able to gather all the energy coming from the PVs, resulting in a certain loss of energy. This is confirmed in Figure 3.24. Finally, the evolution of SoC-tanks reveals as expected a better use



of the available hydrogen, even if the Rule-Based Strategy still consume a high amount of it, but in a wrong way. Indeed, the cumulative percentage of the time where an external supply is needed is always superior for the case of the Rule-Based EMS to the one of the FLC EMS, as presented by Figure 3.24.



A. Cumulative percentage of the time when the system does not respond to the demand of energy of the building



B. Corresponding external input of current to provide the missing energy

Figure 3.24 : Comparison of the external supply power needed.

Figure 3.24 A. highlights what was guessed at the days 10 and 11: an important part of the PV input of energy fails to be collected for the Simple EMS, which is highly reduced when FLC EMS is used. We can also notice the small quantity of energy that is not collected by the FLC EMS at day 2 for safety reasons: at that day, batteries and tanks are almost fully charged, the FLC dynamic limiter thus prohibits the electrolyser to operate at full charge.

Eventually, we can expect that the SCs will not strictly remain at a 50% SoC, as the batteries are often fully discharged. Nevertheless, Figure 3.25 highlights the improvement realized by the FLC RMS regulation compared to the rule-based strategy, as the average SoC-SCs is higher.

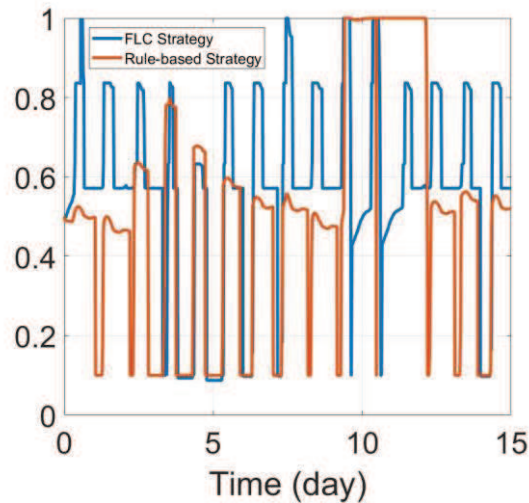


Figure 3.25 : Evolution of the SoC of the SCs for the two EMS

We can also notice that the FLC EMS better uses the SCs and avoids the SoC to stay at its maximum level contrary to the rule-based EMS.

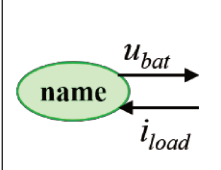
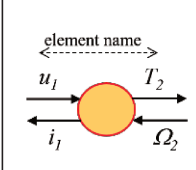
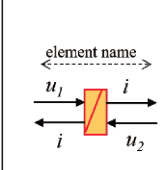
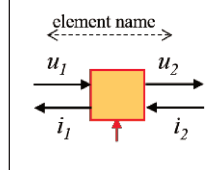
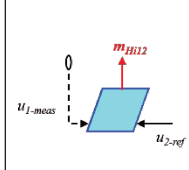
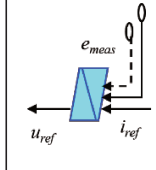
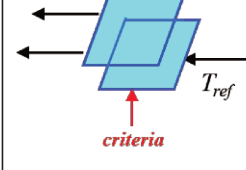

Finally, these results highlight the improved performance obtained with the FLC EMS compared to a simple double layer EMS. Results demonstrate the importance of the EMS in a proper and safe operation of a hybrid autonomous house. Moreover, the dynamic modelling structured with EMR of the building can be a very interesting tool to make further improvements of EMS.

### 3.7 Conclusion

This paper presents a general approach to model and simulate a very complex system of a hybrid autonomous house. A control-oriented modelling of each key elements that compose the whole system was realised and structured using EMR. A general and structured simplification methodology was performed for each subsystem, resulting in a high saving simulation time. Two weeks of dynamic simulations could thus be performed in a few minutes, whereas it would have taken several hours up to several days for the whole complex system without simplification. Eventually, two Energy Management Strategies were developed and compared for a specific case study. The results reveal the high importance of the EMS in the safety and effective operation of the autonomous building, resulting, for the same system, in highly different performance. Finally, this demonstrates that an important work has to be done in developing a performant and secure EMS for the operation of the autonomous building. The FLC EMS proposed is quite easy to implement, but nonetheless being effective compared to simple rule-based strategies. The FLC EMS reduce the cumulative percentage of the time when external supply is needed by around 70% compared to the simple EMS, while reducing also the RMS current of the battery (29.7 A versus 37.7 A, respectively), increasing its average SoC (36.6% versus 30.1%, respectively) and also the one of the supercapacitors (57.19% versus 51.59%, respectively). The general methodology proposed can be easily extended to other systems in a systematic way and the simplification methodology can be very useful as it is a very general approach.

### 3.8 Appendix A: EMR and graphical representation

Table 3.2 : EMR and graphical representation

							
Source element	Multi physical Conversion element	Accumulation element	Mono physical Conversion element	Direct inversion	Closed-loop Control	Coupling inversion	Strategy

# CHAPITRE 4

## SENSIBILISATION AUX ENJEUX ET DEFIS SOCIAUX ET ETHIQUES

### 4.1 Introduction

Au cours des deux premières sections, une approche très technique a été proposée pour dimensionner un bâtiment autonome et pour développer des stratégies de gestion d'énergie. Dans cette partie, une définition moins technique de ce qu'est un bâtiment autonome doit être envisagée : on s'intéresse à l'autonomie dans l'usage que les gens peuvent faire d'un tel bâtiment. On essaie ainsi d'aborder le problème sous un autre angle pour sensibiliser l'étude aux enjeux et défis sociaux et éthiques qui se posent. Pour ce faire, le cas d'usage que l'on choisit est l'instrumentation d'un espace résidentiel sur un site isolé au Canada, pour une petite famille. Les entreprises qui proposent des solutions d'autonomie sont aujourd'hui nombreuses. Un concept en développement de «cubes» autonomes proposés par une start-up française a été étudié. Cette entreprise propose des cubes «tout-intégrés» permettant de gérer l'ensemble des flux (eau et électricité) de façon simple et connectée, au moyen de l'utilisation d'une Intelligence Artificielle (IA) censée gérer de façon optimale le système.

Cette partie se décompose ainsi en trois principaux axes : le premier consiste à effectuer une étude préliminaire du concept, visant à mettre en évidence les enjeux principaux qui apparaissent. Dans un second temps, une approche par les usages responsables (Ur)<sup>1</sup> est réalisée : nous avons choisi deux cas d'usages différents dans lesquels les cubes seraient installés. Cette « projection » dans des usages réels permet de mettre en valeur les impacts sociaux et défis à relever concernant l'autonomie. Enfin, un workshop a été réalisé en équipe au sein du laboratoire de recherche, par des membres ne connaissant pas directement le sujet, apportant un regard neuf. Un compte-rendu de ce workshop est présenté, ce qui permet finalement de mettre en valeur les rapprochements et divergences par rapport à l'étude préliminaire. Ce croisement des résultats donne une perspective des défis que l'entreprise doit relever dans ce champ de l'éthique et des enjeux sociaux.

---

<sup>1</sup> Pour en savoir plus, voir : Legault G., Verchère C., Patenaude J., 2017, « Support for the development of technological innovations: Promoting responsible social uses », Science and Engineering Ethics, ed. Springer.  
[http://link.springer.com/article/10.1007/s11948-017-9911-5?wt\\_mc=Internal.Event.1.SEM.ArticleAuthorOnlineFirst](http://link.springer.com/article/10.1007/s11948-017-9911-5?wt_mc=Internal.Event.1.SEM.ArticleAuthorOnlineFirst)

## 4.2 Étude préliminaire et questions associées

### 4.2.1 Définition du concept : solution permettant de rendre une maison autonome en énergie et en eau

On définit ici un bâtiment autonome comme un bâtiment qui dans l'usage se présente comme un bâtiment classique pour ses occupants, mais qui n'est connecté à aucun réseau régional ou national d'eau ou d'électricité. Ce bâtiment est donc doté d'un ensemble de produits techniques qui confèrent aux utilisateurs une autonomie en énergie et en eau.

Ces solutions techniques combinées permettent de satisfaire les besoins énergétiques (chauffage, ECS, électricité) de la maison. On y inclut les besoins en eau potable. L'apport électrique seul implique que les besoins énergétiques pour l'alimentation peuvent être satisfaits par de l'énergie électrique (pas de gazinière notamment).

Ces solutions permettent en revanche de ne pas se connecter à un réseau électrique, mais de produire localement et de stocker toute l'énergie nécessaire pour vivre.

Comme l'a montré un dimensionnement optimal des principaux composants du système présenté au cours des chapitres précédents, le coût de l'installation dépend de plusieurs critères, notamment :

- ✓ Le mode de vie des habitants :
  - Des habitants souhaitant avoir la qualité de vie d'une classe de population moyenne d'un pays développé, sans surconsommation inutile.
  - Des habitants prêts à restreindre leurs besoins au quotidien
  - Des habitants qui ont un mode de vie « sous-développé » et ont en conséquence une demande moindre.
- ✓ La position géographique (régulation thermique, apport solaire et/ou éolien)
- ✓ La conception du bâtiment (régulation thermique)
- ✓ La prise en compte de l'analyse du cycle de vie du bâtiment, qui peut impacter les solutions retenues dans le système

### 4.2.2 Fonctionnement du système :

Le système est modulable : il tient compte du climat, du bâtiment, du mode de vie de ses occupants pour la qualification du besoin énergétique et de la prise en compte du cycle de vie du système lui-même. De plus, il présente les éléments clés suivants :

- Un ensemble de solutions de **production d'énergie** stockable et **d'eau potable**. Cela passe par un apport d'énergie électrique, d'origine solaire dans notre cas.

- Un ensemble de solutions de **stockage de l'énergie** électrique, à court-terme (échelle de l'heure) et à long terme (échelle du mois). Ces solutions sont essentiellement des batteries électriques, et de l'hydrogène sous forme de gaz comprimé.
- Un ensemble de solutions de **transfert et fourniture** de l'énergie. Cela passe par un réseau électrique et thermique local, un système d'électrolyse, un système de pile à combustible et un ensemble de convertisseurs électriques de puissance permettant les flux électriques entre les différents éléments du système.
- Un système de gestion des flux énergétiques optimal. Ce système électronique assure le contrôle des différents éléments, de sorte que l'habitant n'a pas à interagir directement avec le système complet. **L'installation technique assure elle-même son propre fonctionnement** (en dehors d'une maintenance régulière).

#### 4.2.3 Intérêt du concept :

Une maison bénéficiant d'un tel système peut fournir un accès à l'énergie dans un **site isolé de tout réseau électrique**. Le site peut être isolé soit parce qu'il est difficile d'accès, soit que la région n'est pas suffisamment développée pour que l'implantation d'un réseau électrique soit jugée rentable, ou enfin que le pays lui-même n'est pas suffisamment développé.

A l'inverse, ce système permet aussi de s'isoler, puisqu'il apporte **l'autonomie énergétique**. Les habitants ne dépendent pas du réseau électrique, et du coût de l'électricité. En dehors de la maintenance du système, la maison rendue autonome présente un coût annuel constant, traduisant directement le remboursement initial de l'installation.

De plus, si le système lui-même a été conçu en tenant compte de l'analyse du cycle de vie de l'ensemble de ses éléments, il fait la promesse d'être **écologique et renouvelable**, et d'utiliser les seules ressources disponibles localement pour subvenir aux besoins des habitants de la maison, sans polluer l'environnement direct.

En revanche, la pollution indirecte est possible si l'analyse du cycle de vie n'a pas été prise en compte.

Dès lors, le caractère écologique et renouvelable ne peut être revendiqué que si l'installation du système a bénéficié :

- D'une analyse complète du cycle de vie de l'ensemble de ses éléments.
- Du développement d'accords de marché ou de partenariats étroits pour le recyclage de l'ensemble des solutions retenues.
- En dernier recours, d'une limitation de l'utilisation de produits techniques non recyclables.

Le système est également **modulable**, et se propose de répondre à la demande énergétique de tout type de maison. Il peut d'ailleurs s'agir d'un ensemble de maisons, formant une communauté locale.

#### **4.2.4 Marché potentiel :**

Un tel système permet à une maison d'être autonome en énergie et en eau, en étant respectueux de l'environnement local. Si le système est conçu en appliquant les principes de l'économie circulaire, il peut alors être considéré comme écologique et renouvelable.

A nouveau, il est important de distinguer le résultat (= autonomie) de la manière d'atteindre cette autonomie : suffit-il de considérer qu'on « rend un maison autonome » ? Ou faut-il au contraire penser qu'à travers cette démarche, il est important de prendre en compte des aspects plus larges, qui visent à diminuer l'impact de l'habitation sur son environnement (direct et indirect) ?

Au Canada, plus de 200 000 personnes vivent dans des sites isolés sans accès au réseau électrique national. Pour cette population, environ 75% de l'énergie produite provient de génératrice à essence. Cette essence est acheminée directement sur place par des camions citernes. Cette population constitue ainsi un marché potentiel important où des bâtiments autonomes pourraient venir remplacer les génératrices traditionnellement utilisées.[68]

#### **4.2.5 Rendre possible le concept retenu :**

Pour offrir le service « rendre une maison autonome en énergie et en eau », il faut pouvoir proposer au client l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation du système. Très concrètement, plusieurs possibilités sont à envisager :

- Concevoir l'ensemble des éléments constitutifs du système, et fournir au client un ensemble de sous-produits qui sont nécessaires pour la mise en place du système. Solution difficile à atteindre, mais qui présente de nombreux avantages. Bien que les éléments existent tous sur le marché et sont largement répandus, cela va nécessiter des « armées d'ingénieurs » pour réinventer la roue, et offrir des constituants de qualité au moins équivalente à ce qui est proposé sur le marché. Conséquence directe : perte de temps astronomique dans le développement des systèmes. Par exemple : développement sur mesure de l'ensemble des convertisseurs de puissance, développement des réservoirs de stockage d'hydrogène, développement des batteries au lithium, etc. L'avantage est alors de maîtriser en profondeur tout le système, d'être plus à même d'assurer le service après-vente, d'affirmer une analyse complète du cycle de vie, de pouvoir gérer en interne



la fin de vie et le recyclage des composants usagés du client, etc. Cependant, la mise en place d'une telle structure peut être très difficile. D'ailleurs, cela risque de conduire à des produits d'un coût très supérieur aux produits équivalents du marché, qui sont de fait des concurrents.

- Créer une entité indépendante, et agréger plusieurs industriels reconnus. L'idée est alors de travailler en partenariat et en synergie avec de grands groupes. Pour être considéré comme une entreprise, il faut cependant offrir des produits labellisés, à défaut de quoi il n'y a pas de création de marché, et d'identification au produit. Il ne suffit pas de faire un packaging qui permet d'identifier la marque. Il faut aller au-delà, puisque le concept est d'offrir au client le service « rendre une maison autonome en énergie », qui prend en compte l'aspect écologique et durable. Un facteur différenciant pourrait être d'inclure cette portée au sein des industriels partenaires. Prenons un exemple : si une entreprise de fabrication d'onduleur de puissance est partenaire du groupe, la contrepartie est qu'elle modifie localement (au sens, uniquement pour le produit destiné au groupe) la fabrication de son produit. En somme, son objectif sera de produire un produit présentant la même fonction que son produit initial, mais incluant une prise en compte de l'analyse du cycle de vie, de la provenance de sa matière première, et la garantie de recycler ce dernier. Cela diminuera substantiellement la marge potentielle sur le produit, mais augmentera sa propre image de marque, en revendiquant des produits sous un certain label, pour le compte du groupe. En retenant cette solution, le groupe n'a alors à charge que d'assurer l'architecture globale du système : il s'agit très concrètement d'assurer la bonne interconnexion des différents éléments, et de proposer des standards de packaging. Un dernier aspect important réside encore dans la gestion efficace et intelligente des flux d'énergies, ce qui implique d'avoir correctement interconnecté les éléments entre eux.

#### 4.2.6 Enjeux préliminaires principaux

Rendre une maison autonome peut présenter des impacts aussi bien positifs que négatifs : il faut veiller à ce que le produit fournit soit effectivement **écologique**, et bénéficie d'une analyse fiabilisée du cycle de vie de ses composants.

Pour que ce caractère écologique puisse être garanti, une **certification** peut être revendiquée. Si elle n'existe pas, il faut l'établir.

Il faut que le produit soit **légal** : la maison ne sera pas connectée au réseau électrique, il faut donc avoir le droit de ne pas connecter la maison.

Il faut que le produit soit **économiquement viable** : si le système n'est pas rentabilisable pour le client ou pour l'entreprise, le marché potentiel risque de s'écrouler.

Le produit doit être **fiable** et **susciter la confiance**. L'utilisateur doit croire au produit et en sa capacité à rendre effectivement la maison autonome. Pour cela, un démonstrateur semble être le

minimum requis pour susciter la confiance : « il faut le voir pour le croire ». De même, il est très important d'être transparent. Le produit doit susciter l'**adhésion**, et une opinion positive de la population locale. Il doit ainsi être en mesure de démontrer son bien-fondé, et son impact positif.

Proposer une installation clé en main nécessite également de maîtriser et d'avoir à disposition les différentes **normes du bâtiment**, du pays concerné.

Le système présente un danger potentiel, par nature. Il gère de grands flux d'énergie, et stocke également plusieurs semaines de besoins énergétiques. Il faut donc définir les **responsabilités** du groupe et de l'utilisateur, en cas de panne, ou de blessures.

Il faut également pouvoir **assurer l'utilisateur** en cas de panne du système : des équipes doivent être dédiées au service après-vente et à la **maintenance** des différentes installations.

Les éléments de stockage d'énergie, de par le risque de blessures graves voire mortelles, doivent faire l'objet d'une étude plus particulière : dans quelle condition peut-on mettre à disposition de l'utilisateur des réservoirs d'hydrogène, potentiellement explosifs ? Quels sont les **critères à respecter** ? On peut par exemple se référer aux citernes de fioul pour en déduire la législation en vigueur.

### 4.3 Approche par les Usages Responsables (Ur) appliquée au contexte québécois

Dans ce chapitre, une méthodologie générale est présentée pour choisir et concevoir des solutions d'autonomie au Québec qui intègrent les enjeux d'impacts sur la société et dans les usages dès la conception.

#### 4.3.1 Préalable : réglementation et intention d'innovation

Notre approche consiste à analyser si le concept d'autonomie peut s'appliquer dans un contexte de climat froid, comme au Québec par exemple.

##### Cadre réglementaire actuel en Estrie :

Au Canada, le secteur du bâtiment est réglementé par le Code National du bâtiment (CNB) et le Code Modèle National de l'énergie pour les bâtiments (CMNEB). Chaque province bénéficie ensuite de « sous-réglementations » qui ont aussi à charges de combler le vide juridique éventuel. Au Québec, il s'agit du Code de construction du Québec, qui est prioritaire sur tous les règlements municipaux.

Précisons dans un premier temps que la question générale des maisons autonomes, « déconnectées » du réseau électrique ne font pas l'objet de textes spécifiques dans la réglementation actuelle. Une recherche par mots clés (« autonome », « isolé », « photovoltaïque », « déconnecté », « décentralisé ») n'est pas concluante. Au Québec, même la question de l'autoproduction d'électricité est relativement ambiguë par certains aspects.

La législation en vigueur au Québec concernant la question générale de l'accès à l'énergie pour le secteur résidentiel est accessible depuis le site LégisQuébec, dans le document intitulé « loi sur la régie de l'énergie. » On y définit notamment :

- *« fournisseur d'électricité » : quiconque étant producteur ou négociant d'électricité fournit de l'électricité ;*
- *« distributeur d'électricité » : Hydro-Québec dans ses activités de distribution d'électricité ;*
- *« réseau de distribution d'électricité » : l'ensemble des installations destinées à la distribution d'électricité à partir de la sortie des postes de transformation, y compris les lignes de distribution à des tensions de moins de 44 kV ainsi que tout l'appareillage situé entre ces lignes et les points de raccordement aux installations des consommateurs, et, dans le cas des réseaux autonomes de distribution d'électricité du distributeur d'électricité, l'ensemble des ouvrages, des machines, de l'appareillage et des installations servant à produire, transporter et distribuer l'électricité.*

D'après l'article 62 de ce document : *« Le distributeur d'électricité est titulaire d'un droit exclusif de distribution d'électricité sur l'ensemble du territoire du Québec, à l'exclusion des territoires desservis par les réseaux municipaux ou privés d'électricité [...]. Ce droit n'empêche pas le distributeur d'électricité de conclure un contrat d'approvisionnement pour combler des besoins dans un réseau autonome de distribution d'électricité. »*

En revanche, il n'est pas fait mention de restrictions éventuelles concernant un bâtiment qui serait isolé du réseau électrique.

Dans le cas d'un bâtiment connecté au réseau, Hydro-Québec (HQ) n'achète pas de surplus, mais donne des crédits (=kWh) aux auto-producteurs, s'ils souscrivent au programme de « mesurage net » de leur production électrique. Un auto-producteur n'a aucun intérêt à produire plus d'énergie que sa propre consommation, car la réglementation en vigueur ne permet pas à HQ d'acheter de l'électricité sans passer par un processus d'appel d'offre. De plus, si le système est rattaché au réseau, et n'utilise qu'une architecture simple avec un seul onduleur conforme, alors une coupure du réseau entraînera un arrêt de fonctionnement de l'onduleur afin de limiter les risques pour les opérateurs effectuant la maintenance sur le réseau.

Dans le cas d'un bâtiment isolé, il n'est alors plus question du programme de « mesurage net » d'HQ. Cependant, une installation autonome doit respecter les sections du « Code de construction du Québec et du Code de sécurité du Québec ». Il faut de plus que l'installation soit conforme au Code canadien de l'électricité et du code de l'électricité du Québec (régie du bâtiment du Québec, 2009a), et notamment qu'elle respecte les normes CSA ou autres. En

somme, il devient souhaitable qu'un électricien compétant en système photovoltaïque puisse installer le système chez l'opérateur.

Enfin, concernant l'approvisionnement aux sources autres que l'électricité, l'article 74 mentionne :

*« Le distributeur d'électricité ou tout distributeur de gaz naturel doit soumettre à l'approbation de la Régie leurs programmes commerciaux.*

*Dans un territoire desservi par un réseau autonome de distribution d'électricité, le distributeur d'électricité peut également soumettre à l'approbation de la Régie des programmes commerciaux visant d'autres formes d'énergie afin d'assurer que les consommateurs de ce territoire bénéficient d'un approvisionnement en énergie leur permettant un traitement équitable par rapport à tout autre consommateur d'électricité distribuée par le distributeur d'électricité pour le chauffage résidentiel et le chauffage de l'eau.*

*Lorsqu'elle étudie une demande visée au présent article, la Régie doit notamment tenir compte de l'évolution des pratiques commerciales et de la rentabilité des programmes commerciaux en considérant leurs impacts sur les tarifs du distributeur. »*

### 4.3.2 Détermination des facteurs différenciants

*On définit dans cette partie sous l'appellation de « Facteurs différenciants » tout ce qui distingue le produit étudié des autres (par rapport au marché, non par rapport à la technique).*

#### Vision commerciale :

A la différence des solutions proposées sur le marché, la solution envisagée se veut être **facile d'installation et intuitive**, en permettant à l'utilisateur de **comprendre comment fonctionne son « bâtiment autonome »**. De plus, la solution se dit **intelligente et connectée** : l'utilisateur n'a pas à adapter son mode de vie en fonction de la météo, mais c'est la solution elle-même qui se gère. Elle pourra, via le téléphone de l'utilisateur par exemple, proposer la mise en route d'une lessive ou d'un réfrigérateur à une heure stratégique. Enfin, la solution est **modulable**, pour s'adresser au besoin de n'importe quel bâtiment.

#### Analyse des concurrents actuels principaux :

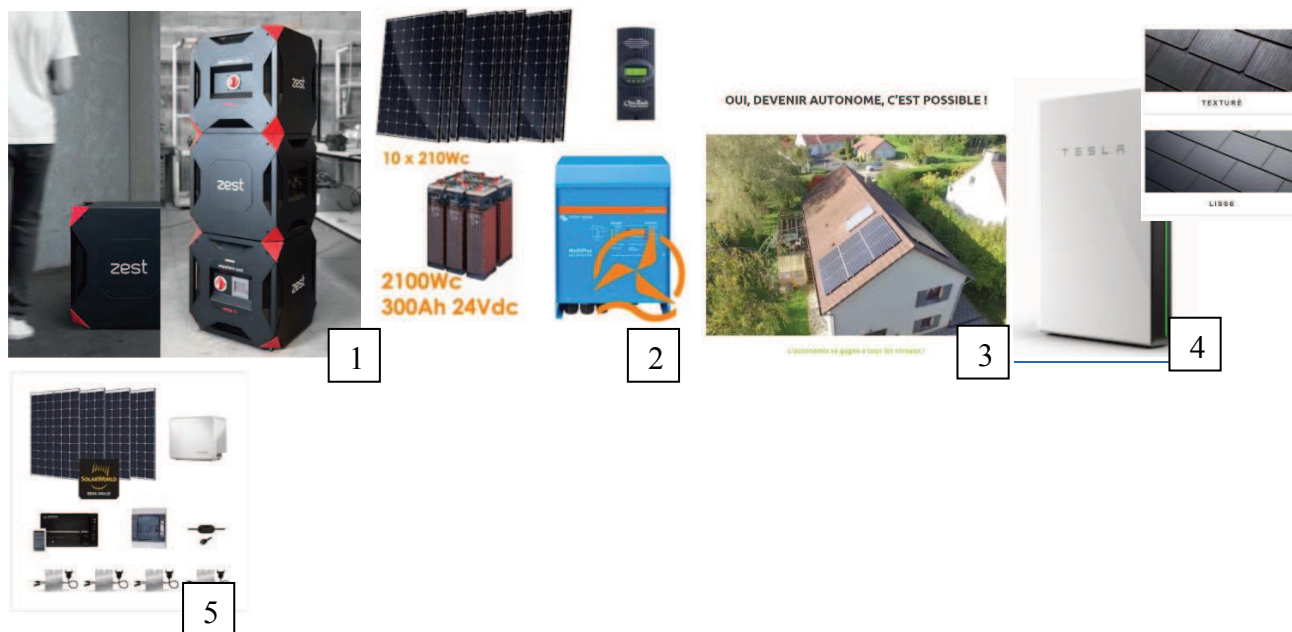


Tableau 4.1 : Arguments de vente comparés de 6 technologies proposant des solutions d'autonomie

Eléments haute qualité	Autonomie, c'est possible	Foyer auto-alimenté de jour comme de nuit	Excellent rendement, produit haute technologie
« rolls des kits solaires »	Rénovation ou construction	Démarche complète : « réservation du produit, évaluation du foyer, confirmation de la commande, installation »	Facile à installer, suivi de la production et de la consommation en temps réel
Alimentation d'une maison entière	Difficulté technique : non, mais mode de vie et comportement	Automatique, installation facile, 0 entretien, pas de bruit.	Garantie des composants 10 à 25 ans
Permet utilisation réseau ou GE	Introduction notion patience et responsabilité	Onduleur intégré, coût et complexité réduits	Réduction facture, produit conforme
Eléments offerts	Consulting, géobiologie, conférence de présentation	Connecté, MÀJ à distance. Application smartphone ; Installateurs certifiés, garantie 10 ans.	Guide de montage simple
Kit solaire complet Energie Douce (image <a href="#">2</a> )	Solution d'autonomie de TOITOT (image <a href="#">3</a> )	Batterie domestique Powerwall Tesla (image <a href="#">4</a> )	Kit solaire d'autoconsommation Myshop (image <a href="#">5</a> )

### Synthèse globale : les grandes catégories d'arguments

- Technologie de pointe, fiable et robuste, sans entretien avec garantie, etc.
- Liberté, indépendance et pouvoir donnés aux propriétaires
- Autonomie énergétique et disponibilité à tout moment de la journée
- Démarche complète facilitée, et accompagnée. Installation facile.

### Distinction des « cubes connectés » des autres produits du marché :

Le marché (sauf TESLA) ne propose pas de produits, mais des kits ainsi qu'un certain niveau de service au client. Le marché de « **produits tout-en-un** » (1 cube vs plusieurs éléments à rassembler) permettant l'autonomie n'est quasiment pas concurrencé (sauf Powerwall). Ce système est **ici intégré** : tous les éléments permettant de rendre une maison autonome existent sur le marché. Qu'ils s'agissent de fournisseurs de panneaux photovoltaïques ou de batteries, d'entreprises d'installations de réseaux électriques, de fournisseurs de convertisseurs de puissance tels que les onduleurs ou des électrolyseurs alcalin, il est possible pour un citoyen lambda de se procurer ces éléments. Néanmoins, il n'existe pas d'entreprises offrant au client d'installer le système complet pour rendre la maison autonome. A travers le terme de « système complet », il faut inclure le système de gestion de l'énergie, faisant en sorte que l'utilisateur bénéficie d'une maison rendue autonome.

Sur le marché, il est aujourd'hui possible d'acheter un système photovoltaïque « clé en main », en incluant l'installation du système. En revanche, l'installation d'un système complet pour avoir, « clé en main », une maison « rendue autonome » n'existe pas.

Le système étudié propose aussi une gestion « **multi-fluides** ». En plus de l'électricité absolument nécessaire pour les occupants du bâtiment, ce système propose également la production et la fourniture d'eau potable via des systèmes de récupérations de l'humidité de l'air combinés à différents processus de filtration.

Enfin, ce système propose une gestion automatique et autonome en utilisant une **Intelligence Artificielle** qui utilise les données de l'utilisateur pour adapter et améliorer la gestion d'énergie et d'eau.

### **4.3.3 Cas d'usage 1 : instrumentation d'un « espace » sur un site isolé au Canada**

Prenons l'exemple d'un bâtiment, dont la fonction n'est pas définie, situé sur un site isolé. Cela peut concerner par exemple un village autochtone, un site minier, un chalet d'été, une habitation

sur une île du Saint-Laurent, un camping de vacances. Le responsable de cet espace souhaite le rendre autonome, en utilisant la solution que nous proposons.

Le responsable de ce projet, désigné sous l'appellation Mr X par commodité, doit dans un premier temps pouvoir **contacter directement un responsable** commercial de l'entreprise, pour lui présenter le projet. Il va vouloir obtenir une **estimation du coût de l'installation complète, le temps nécessaire à la mise en place de notre solution**, et comprendre à l'avance quels seront **les impacts dans l'usage au quotidien** de son bâtiment suite au choix de la solution. Il faut donc que le responsable commercial soit au cœur d'une petite équipe pluridisciplinaire, qui puisse répondre à ses questions. Il semble normal de penser que Mr X aura intérêt à **rencontrer directement l'entreprise**. Il faut donc un **espace dédié**. Idéalement, cet espace doit lui-même utiliser les solutions vendues. Mr X. Mr X voudra savoir s'il achète ou loue nos solutions, les **garanties** dont il dispose, les avantages et les inconvénients qu'offrent nos solutions.

Mr X doit aussi savoir **où acheter ou louer nos produits**. Doit-il exister un bâtiment physique dans lequel il est possible de « rayonner » et d'acheter directement les différents produits ? Ou bien faut-il privilégier l'approvisionnement par livraison sur le lieu ? Étant donné le caractère isolé de l'espace à rendre autonome, la livraison peut être par définition contraignante pour l'entreprise, tandis que l'approvisionnement en magasin sera contraignant pour lui.

De même, **Mr X possède-t-il les produits ? Ou sera-t-il simplement locataire des systèmes ?**

Une fois en possession de la solution, il voudra **l'installer au sein de son bâtiment**. La présence **d'un agent spécialisé** est-elle dispensable ? La réponse semble négative pour garantir le bon fonctionnement de l'installation et le respect des normes électriques en vigueur... Cependant, cette installation accompagnée est-elle suffisante pour que **Mr X soit formé à l'utilisation de la solution** ? Ou peut-il utiliser les solutions sans comprendre le fonctionnement et sans pouvoir agir par lui-même ? Il importe ainsi que le système soit d'une fiabilité absolue pour éviter toute difficulté par l'électricien présent sur place, de sorte que Mr X ne perde pas confiance en sa capacité à maîtriser son système.

Une fois en possession de la solution, Mr X bénéficie d'un accès à l'énergie dans son bâtiment, en tout temps. En plus de cet accès, il acquiert aussi une maîtrise et une compréhension des flux d'énergie dans son bâtiment, notamment via son téléphone au travers duquel l'intelligence artificielle (=IA) communique.

Au quotidien, l'utilisation se veut extrêmement simple : en temps normal, Mr X n'a rien à faire, et peut simplement suivre à titre d'information comment fonctionne la solution, en regardant par exemple le niveau de chargement des batteries ou réservoir d'hydrogène ou en recevant l'information de ses appareils qui consomment le plus.

Quand les conditions météorologiques ne sont pas optimales, et que cela engendre un risque de ne plus avoir accès à l'énergie, l'intelligence artificielle communique avec l'utilisateur, en lui formulant des **recommandations pour adapter sa consommation**. Quoiqu'il en soit, il peut

demander en tout temps à l'intelligence artificielle qu'elle lui communique toute sortes d'informations sur le fonctionnement du système.

S'il garde le système pendant un certain temps, la question de la **maintenance** pose problème. A-t-il à charge d'effectuer lui-même la maintenance de l'installation ? Est-ce possible ? Ou doit-il convenir dès l'achat/location d'un contrat de maintenance assurant un passage régulier d'un des agents ? Dans ce cas, il peut être intéressant pour l'entreprise d'avoir accès aux données du système, pour effectuer en partie un suivi à distance. SI par contre il effectue lui-même la maintenance, il faut que celle-ci soit sans risque pour Mr X. Dans ce cas, il faut prévoir dès la conception les éléments qui nécessitent une maintenance et les rendre accessible sans danger. A minima, il faut prévoir des notices de maintenance, dans la langue de l'utilisateur. Mr X doit être formé sur les principaux risques de détérioration ou de pannes de la solution, ce qui implique que le système ait déjà été testé en situation réelle sur le long terme. Il doit savoir entretenir son parc solaire.

S'il décide de partir pendant un certain temps (vacances, etc.), il doit assurer la sécurité de son espace, puisqu'il ne pourra plus intervenir sur place. Dans ce cas, il doit avoir la possibilité d'arrêter facilement l'installation.

**En cas de pannes, qui est responsable ?** Comment définir la responsabilité de chaque partie ? Si on lui vole tout ou partie de la solution qu'il a installé, **quelle assurance** ? S'il y a une détérioration à cause des conditions climatiques (inondation, foudre, vieillissement prématuré de l'onduleur), les frais sont pour qui ?

S'il veut se séparer du système, doit-il lui-même revendre son système ? Si oui, à qui et par quels moyens ? Sinon, on peut imaginer qu'il contacte l'entreprise, qui pourrait racheter pour revalorisation la solution, à un prix qui sera fonction de l'ancienneté d'usage de la solution. Il pourra choisir, ou pas, de laisser à l'entreprise les données emmagasinées par l'intelligence artificielle. Une question se pose : doit-il lui-même désinstaller et ramener le système en magasin ? Ou est-ce que c'est à l'entreprise de venir récupérer l'installation ?

### **A) Récapitulatif actions/moments qui suscitent un questionnement**

- Existence ou non d'un magasin physique ?
- Qui contacter ? Existence ou non de bureaux « d'avant-projet » ?
- Équipe commerciale dédiée ?
- Location ou achat de la solution ?
- Installation « autonome » ou accompagnée ? Formation ou non de l'utilisateur ?
- Assistance téléphonique pour pannes et/ou questions diverses ?
- Assurance vol ou dégâts climatiques, responsabilité ?
- Défaut constaté : à moi de remplacer ? Quel coût ?
- Je veux modifier le système (ex : je n'ai pas assez d'électricité, je veux installer plus électroménager) : je vais où ? J'appelle qui ? Tarif avantageux ?
- Responsabilité en cas de blessure de l'utilisateur ? Sécurité de l'installation ?



- Garantie du système ?
- Maintenance « autonome » ou accompagnée ? Assistance « maintenance téléphonique » ?
- Intervention ou non de l'IA sur le fonctionnement de l'électroménager ?
- Revente possible à l'entreprise ? A moi de les ramener ?
- Mes données d'utilisation personnelles : strictement privée ? Ou utilisable par l'entreprise ?

## **B) Points clés par rapport à la situation initiale**

Après installation des solutions d'autonomie dans son lieu :

- Accès limité ou non à l'électricité. Indépendance énergétique.
- Possibilité d'introduire de l'électroménager, de l'éclairage, de consommer de l'énergie.
- Coût important du système. Besoin d'assurer une maintenance minimale.
- Risque de défaillance et donc perte des gains apportés => dépendance.
- Danger potentiel lié au stockage d'énergie chez lui.

### **4.3.4 Cas d'usage 2 : instrumentation d'une maison raccordée au réseau électrique au Québec (Estrie)**

Mr X, propriétaire d'une maison à Sherbrooke, souhaite rendre son logement autonome, en utilisant les solutions de l'entreprise.

D'un point de vue légal, il peut décider de se déconnecter ou non du réseau. La démarche de récupération et d'installation des solutions est identique au cas précédent.

En revanche, l'utilisateur choisit ou non d'être rattaché au réseau électrique de Sherbrooke. S'il est rattaché au réseau et qu'une panne survient, le système va s'arrêter (arrêt de l'onduleur, s'il est conforme aux normes en vigueur et présente une sécurité permettant de prévenir de l'îlotage).

Mr X ne pourra pas revendre sa production à Hydro-Québec, mais il aura des crédits de consommation. En somme, il a tout intérêt à produire juste ce dont il a besoin.

Dans la suite, on suppose qu'il a choisi de rester connecté au réseau.

Au quotidien, notre solution se gère d'elle-même, et l'utilisateur n'a pas besoin d'intervenir. Étant relié au réseau, il peut consommer autant qu'il le souhaite puisqu'au pire, il prélèvera simplement de l'énergie au réseau.

En cas de panne de la solution, il bénéficie toujours d'accès à l'énergie grâce au réseau, mais il doit tout de même réaliser une maintenance : peut-il le faire lui-même ou doit-il avoir accès à une assistance d'entretien ?

## **A) Points clés par rapport à la situation initiale**

Après installation des solutions d'autonomie dans son lieu :

- Pas de gain en terme d'autonomie. Si le réseau se coupe, il n'a plus d'énergie.
- Pas de réduction de l'empreinte environnementale, puisque l'hydroélectricité prime au Québec.
- Coût important du système et besoin d'assurer une maintenance minimale.
- Danger potentiel lié au stockage d'énergie chez lui.
- Rentabilité très difficile du système : il ne peut vendre son énergie à HQ. Il a tout intérêt à minimiser le coût, quitte à ne pas pouvoir stocker d'énergie : inutile d'ailleurs puisque connecté au réseau.

En somme, Mr X n'a aucun intérêt à rendre sa maison autonome, aussi longtemps qu'HQ pourra couvrir les besoins de la population sans inondations majeures et que le prix de l'électricité du réseau restera aussi bas.

## **B) Parties prenantes concernées**

- Le propriétaire du bâtiment
- L'entreprise (vendeur, équipe commerciale)
- Le fournisseur de solution (livreur externe ?)
- Le gestionnaire de réseau
- L'électricien (pas forcément de l'entreprise : formation spécifique ?)
- Les utilisateurs du bâtiment
- L'agent de maintenance
- Le formateur
- L'assureur
- Les visiteurs potentiels (démonstration potentielle ?)
- Les partenaires industriels : fournisseur de PV, batterie, réservoirs, etc.
- Les fournisseurs de matière première ? (ex : condition travail gisement à Chibougamau ≠ lithium au salar d'Uyuni en Bolivie, ou mine de Cobalt en RDC...)
- Les entreprises de recyclage

### **4.3.5 Intention de l'entreprise et impact dans l'usage : autonomie vs écologie**

#### **A) Impact souhaité : « augmenter l'autonomie »**

Définition autonomie : faculté d'agir librement et de façon indépendante.

Dans la suite, on désigne par « cube » un constituant de la solution rendant le bâtiment autonome, soit un élément du système. La solution complète est constituée d'un ensemble de

cubes de tailles variables, plus des panneaux photovoltaïques, et des câbles électriques qui relient le tout.

Augmenter l'autonomie dans l'usage du site implique :

- Diminuer la dépendance aux conditions météorologiques, et donc :
  - augmenter le coût du système pour l'utilisateur (augmentation différente si on prend en compte l'aspect « écologique »)
  - augmenter le volume du système
  - des « cubes » de stockage beaucoup plus gros que pour une solution classique
  - potentiellement, une pièce dans le bâtiment dédiée

Au final, cela permet au site de fonctionner normalement peu importe les conditions météo. On diminue la dépendance aux aléas météo.

Augmenter l'autonomie des personnes implique :

- Diminuer leur dépendance à l'entreprise, et donc :
  - Proposer un magasin, au sein duquel Mr X vient acheter/louer ses cubes. Il peut les rapporter aussi quand ils sont défectueux, ou qu'il veut les revendre
  - Faciliter l'installation des cubes, pour que Mr X n'ait pas besoin de la présence d'un électricien => fournir des vidéos d'installations, limiter les branchements externes des cubes au strict minimum.
- Assurer la possibilité que l'utilisateur seul puisse transporter/installer les cubes
- Diminuer l'impact de l'IA sur le fonctionnement de son bâtiment
- Faire en sorte que Mr X oublie le système au quotidien, et donc pas de dépendance aux aléas météo => augmentation du coût car + de stockage
- Simplifier la maintenance, qui doit pouvoir être faite par Mr X.

## **B) Impact souhaité : prise en compte de l'écologie**

*Définition au sens courant de l'écologie : Doctrine visant à un meilleur équilibre entre l'homme et son environnement naturel ainsi qu'à la protection de ce dernier.*

La prise en compte de l'écologie a des conséquences différentes, suivant l'angle choisi.

### **4.3.5.1 Des cubes « écologiques »**

Si l'on souhaite proposer des cubes « écologiques », il faut minimiser l'impact négatif des cubes sur l'environnement :

- Effectuer une analyse du cycle de vie (ACV) de tous les composants
- Avoir des partenariats pour le recyclage des composants.

- Vérifier l'origine des produits, et le respect des conditions de travail/impacts environnementaux
- Limiter l'utilisation de produits toxiques (ex : batterie au plomb)

#### **4.3.5.2 Un site ou un usage écologique**

Un site écologique devra limiter son impact direct sur l'environnement. Ainsi, avant même l'installation de nos solutions, Mr X doit chercher à minimiser sa consommation énergétique. Une fois les solutions installées, il minimise l'utilisation du système au strict minimum, pour augmenter sa durée de vie.

#### **4.3.6 Synthèse de l'analyse**

Cette approche préliminaire par les « usages responsables » permet, à travers l'étude d'un cas d'usage fixé, de cheminer progressivement vers la détermination des principaux défis que doit relever l'entreprise. Dans un premier temps, l'analyse du cadre réglementaire en Estrie permet d'en déduire la possibilité ou non d'implanter la solution proposée. L'analyse des produits concurrents aux solutions que nous étudions met en valeur de façon systématique les facteurs différenciants entre cette solution et la concurrence sur le marché. Puis, la description de 2 cas d'usages différents en Estrie a dans notre cas mis en évidence que le cas d'usage d'un bâtiment déjà connecté au réseau était beaucoup moins pertinent, compte tenu des contraintes réglementaires de la région ciblée. On affine ainsi le marché à cibler. De plus, ce cas d'usage éclaire de façon systématique les parties prenantes impliquées, ce qui facilite la détermination des défis que doit relever l'entreprise en soulignant les interactions entre les différents acteurs. Grâce à ce cheminement, un premier dilemme environnemental a été mis en évidence.

## 4.4 Compte Rendu du Workshop « Autonomie et bâtiments autonomes »

Il s'agit ici d'un compte rendu « à plat » du workshop organisé le 17 mai 2018 au 3IT (séances organisées à l'aide de post-it avec 5 personnes du 3IT non spécialistes de l'autonomie).

### 4.4.1 Axes innovants et impacts

#### A) Cubes « intégrés » / kits d'éléments

##### 4.4.1.1 Aspects positifs :

- Simplicité dans l'usage => **utilisateur**
- « ma grand-mère peut l'utiliser » => **utilisateur**
- Visuel attirant => **utilisateur**
- Installation facilitée => **utilisateur**
- Bon WAF ? => **utilisateur**
- Facilement déplaçable/transportable => **installateur/utilisateur**
- Transport par camion => **livreur**
- Facile à changer en cas de problème => **installateur/utilisateur**
- Sécurité => **utilisateur**

##### 4.4.1.2 Aspects négatifs : limites dans l'usage de l'électricité et de l'eau :

- Manque de flexibilité : réponse à toutes les situations ?
- Surcoût => **propriétaire**
- Qu'est-ce qui se passe si le bâtiment change de fonction ?
- Comme il n'y a pas le même niveau de maintenance, risque de « pas de maintenance ».  
Ex : filtre à eau. => **propriétaire**
- Difficulté de maintenance, démontrabilité ? Jetable ?
- Compréhension de quels cubes fait quoi ? => **utilisateur**
- Transport en avion => **livreur**
- Installation pas facile
- Réparation possible ? => **agent de maintenance**
- Pas de culture de la maintenance ajd (ça marche tout le temps, tout seul). Responsabilité de la maintenance ?
- Si trop de contraintes, risque de débrancher les prises. => **utilisateur**

## **B) Multi-fluides / Mono fluides**

- Intégrer quelle gestion de déchets ?

### **4.4.1.3 Aspects positifs :**

- Un seul interlocuteur => **propriétaire**
- Filtration de l'eau possible
- Adaptable
- Possibilité de synergie : communication entre les 2 systèmes
- Pas besoin de réfléchir => **utilisateur**

### **4.4.1.4 Aspects négatifs :**

- Inutile, pas besoin de cubes eau
- Système dysfonctionnel. Eau polluée ? => **utilisateur**
- Eau glacée/ gelée ?
- Besoin supplémentaire en électricité
- Au Québec, le problème ne se pose pas pour l'eau : les puits sont partout !

## **C) Utilisation d'une Intelligence Artificielle (=IA) / Absence IA**

### **4.4.1.5 Aspects positifs :**

- Simplicité/ pas de souci => **utilisateur**
- Prévision possible à long terme
- Information supplémentaire utile => **utilisateur**
- Adaptabilité / évolution en fonction du besoin

### **4.4.1.6 Aspects négatifs :**

- Rachat des données personnelles
- Impact sur le coût => **propriétaire**
- Risque de dysfonctionnement du système
- Piratage possible => **utilisateur**
- Contradiction « amoureux de la nature » vs IA
- Mal perçu, car intrusif. => **utilisateur**
- Quelles actions supplémentaires pour l'utilisateur ? Interface ?? => **utilisateur**

## 4.4.2 Conséquences de l'utilisation du produit dans les usages

### Axe technique

- Savoir-faire pour installer les cubes ? car c'est « tout-intégré » ...
- Défi pour l'électricien : formation envisageable et/ou nécessaire ?

### Aspect social et identitaire

- Lien entre dimension écologique et ces modules : déchets, IA, etc.
- Identification au produit (appropriation). Elément distinctif (lié au caractère « cube intégré »)

### Usage

- Quel que soit la taille du chalet, j'ai la solution.

### Marché potentiel et aspect économique

- Usage du cube eau selon les populations (ex. : Grand Nord). Mitigé comme réception
- Énergie dans le Grand Nord de nuit ?...

### Enjeu sanitaire

- Risque d'intoxication (« eau potable »)

### Confort pour l'utilisateur

- Confort supérieur dans le chalet (élec et eau)
- Pas de bruit (cf. comparaison avec utilisation d'une génératrice)

### Enjeu environnemental

- Impact environnemental ? Compromis avec le niveau de confort

### Acceptabilité sociale et confiance

- Risques de changer ses usages ?
- Stress par peur du manque « autonomie limitée »
- « écolo » et électrosensible.
- Conséquence directe : « si je minimise l'impact, je dois faire la balance avec l'autonomie »
- Si bris : comment je fais si ça tombe en panne ? (cf. climats Grand Nord...)
- Risque de rejet à cause de l'IA

### **Conséquence intermédiaire :**

Marché du camping Nord-Américain ?

⇒ Non, car les campeurs se raccordent directement sur le réseau électrique...

Utilisation PV + module : marché Huttopia ? Camping site écolo et haut de gamme ([voir ce lien](#))

Usage à l'arrivée que TEMPORAIRE. Cf aussi Grand Nord : 6 mois de nuit.

Clients potentiels : fortunés, technophiles/ qui achètent des Apple...  
Techno vs pas de techno : électrosensibilité ??

### 4.4.3 Les défis à relever

Les points suivants ont été mis en valeur :

- ⇒ Enjeu sanitaire
- ⇒ Enjeu environnemental
- ⇒ Viabilité économique
- ⇒ Adaptabilité au climat (cf. climat très froid)
- ⇒ Acceptabilité sociale/ feedback utilisateur
  - IA : modèle d'affaire => Bcorp ? ([voir ce lien](#))
  - Réseau autonome non connecté à internet vs Connecté à internet ?
  - Clé « données cellulaires » ?
  - Déconnecté vs pas connecté ?

Eau « potable » qui ne l'est plus. / !\ couper accès à l'eau après une certaine utilisation (par ex : IA lance des alertes, puis coupe l'eau). Faciliter l'accès aux cartouches. Donner info sur la qualité de l'eau. Capteur ?

Analyse du cycle de vie + balance environnementale, autonomie

Pompe en plein air ? Back wash ? et Adoucisseur (1 partie de l'eau utilisée sert à nettoyer les filtres)

- Data IA
- Environnement / Autonomie
- (éviter WiFi) : acceptabilité sociale/ fonctionnement du système + Compteur intelligent
- Impact : problématique du cycle de vie / Branding et marketing de la marque

De façon plus détaillée, voici les aspects prioritaires qui posent question aujourd'hui :

- **Dilemme éthique** : l'entreprise concernée propose une gestion du système autonome en utilisant une Intelligence Artificielle (IA) qui a besoin d'un grand nombre de données recueillies pour fonctionner correctement. Ainsi, l'utilisateur devrait idéalement fournir l'ensemble de ses données de consommation à l'entreprise afin que l'IA s'améliore. Plus l'IA est aboutie, plus elle est précise, ce qui augmente par voie de conséquence la fiabilité du système, et la confiance que l'utilisateur pourra avoir dans le bon fonctionnement du système. Cependant, l'autonomie dans l'usage qui est souhaitée par l'utilisateur est en parfaite contradiction avec la nécessité pour lui de fournir toutes ses données s'il veut que son système fonctionne. Plusieurs problématiques liées à la gestion et aux transferts des données sont ainsi à résoudre par l'entreprise :



- La gestion des données et l'utilisation d'une intelligence artificielle : une intelligence artificielle n'est pas forcément nécessaire pour le bon fonctionnement du bâtiment. Si on s'en affranchit, on évite potentiellement le besoin de communiquer les données de l'utilisateur. Le bâtiment peut fonctionner correctement en utilisant des algorithmes plus ou moins complexes, mais en s'affranchissant de l'utilisation d'une intelligence artificielle. Dans le cas des bâtiments autonomes, une redéfinition des fonctions attribuées à l'intelligence artificielle est nécessaire. Si un transfert de données est néanmoins retenu, il faut définir précisément et en amont de la commercialisation des produits la manière de gérer les données reçues. On pourrait envisager un système qui ne stocke pas de données d'utilisation directement (heure d'utilisation du réfrigérateur, de la TV, etc.) mais qui sauvegarde plutôt des données dérivées comme les paramètres optimisés de ses algorithmes : en effet, de telles données peuvent être suffisantes pour que l'intelligence artificielle fonctionne correctement sans qu'elles soient réellement représentatives du comportement des occupants du bâtiment.
- La communication par clé cellulaire des différents systèmes entre eux pose aussi un problème d'acceptabilité sociale et de sécurité. Par exemple, le compteur Linky en France imposé par ENEDIS suscite des débats en partie sur la gestion des données personnelles et sur les risques sanitaires potentiels. Peut-être faut-il éviter d'utiliser une communication par Wifi, pour limiter le risque de piratage du système, et utiliser ainsi d'autres fréquences. Cependant, utiliser des bandes de fréquence différentes implique que les études sanitaires associées sont moins développées et que la communication peut être plus difficile dans le bâtiment (les murs peuvent empêcher le passage des ondes).
- **Dilemme environnemental** : Le couple autonomie/environnement soulève aussi un autre dilemme. Plus on cherche à rendre le fonctionnement du système dans l'usage similaire à celui d'un bâtiment connecté à un réseau électrique, plus les solutions technologiques nécessaires sont importantes, impliquant notamment un stockage long terme d'énergie. Par voie de conséquence, cela augmente l'impact sur l'environnement du système et de son utilisation : on a besoin d'aménager plus d'espace pour l'implantation de réservoir d'hydrogène, les différents composants sont plus conséquents et impliquent un impact plus important dans la fabrication puis la fin de vie. Ainsi, gagner en autonomie dans l'usage implique d'être moins exigeant d'un point de vue environnemental. De plus, avoir l'impact le plus faible possible sur l'environnement se traduit par ne pas utiliser de telles solutions, quitte à ne pas être autonome. Une piste d'amélioration des solutions proposées consiste à résoudre la problématique du cycle de vie des produits proposés :
  - Gestion du cycle de vie : il faut choisir si les produits proposés doivent être vendus ou loués au consommateur. Il faut gérer en amont le recyclage des produits usagés. Si les produits sont vendus, il faut prendre en compte la maintenance du système. De façon générale, une entreprise proposant des solutions d'autonomie doit dans un premier temps développer le branding et le marketing de sa marque afin qu'elle soit associée

à juste titre à une entreprise respectueuse de l'environnement et soucieuse de la qualité et de la gestion du cycle de vie de ses produits. Cela peut aussi passer par le développement d'accords commerciaux avec des partenaires industriels pour la gestion de la qualité et de la fin de vie de ses produits.

Ces principales conclusions permettent de faire prendre conscience les principaux acteurs de l'entreprise de ces dilemmes éthiques et environnementaux. Cela fournit un éclairage. Si ces dilemmes ne sont pas questionnés et pris correctement en considération, des écarts importants peuvent se produire entre l'intention visé et l'effet produit, écarts qui peuvent de surcroît amener une perte du marché potentiel visé initialement.

## 4.5 Conclusion

Cette approche multiple a permis d'effectuer une première analyse éthique mettant en lumière les enjeux liés au développement potentiel de cubes autonomes proposés par une start-up française. De nombreux aspects doivent à présents être pris en considération : la gestion des données et l'utilisation d'une intelligence artificielle doit être questionnée et un cadre doit être fixé par l'entreprise. Une prise de conscience doit avoir lieu, concernant le fait que les solutions d'autonomie proposées ne sont pas forcément en adéquation avec la valeur de respect de l'environnement. Celle-ci doit amener à faire évoluer la conception des produits proposés, de développer une nouvelle forme de collaboration avec les partenaires industriels et d'intégrer une analyse du cycle de vie des produits proposés. Cela passe aussi par un branding et un marketing de la marque. La communication des données personnelles à l'entreprise fait également débat, et il serait bon de faire une étude à ce sujet pour adapter la gestion des données : si une intelligence artificielle est utilisée, celle-ci peut s'améliorer sans forcément communiquer des données sensibles de l'utilisateur du système. Finalement, de nombreux points ont été présentés dans ce document, tels que la question de la location ou la vente de cubes, la gestion du service après-vente, des pannes et de la maintenance du système. Cela doit permettre dans l'ensemble à l'entreprise d'adapter son développement actuel pour finalement assurer sa pérennité et la concordance des valeurs qu'elles prônent avec les produits et services qu'elles proposent sur le marché.

# CONCLUSION GENERALE

L'ensemble de ces travaux de recherche a permis d'étudier de façon transversale le développement potentiel de bâtiments autonomes sur des sites isolés. Pour rappel, environ 15% de la population humaine mondiale ne bénéficie pas d'un accès à un réseau électrique régional ou national en 2018. Au Canada, ce sont près de 200 000 personnes qui vivent sur des sites isolés, et qui utilisent à plus de 70% des génératrices à essence, essence qui est elle-même acheminée par camions. Par ailleurs, d'un point de vue purement économique, la majorité des énergies renouvelables présentent un coût qui concurrence directement les énergies fossiles aujourd'hui. Combinés aux évolutions actuelles de nos sociétés et à une volonté grandissante de développer une économie alternative, cela peut être de très bon augure pour le développement futur des bâtiments autonomes.

Dans ce contexte, nos travaux ont permis de mettre en évidence l'impact primordial du climat sur le coût total d'installation du système, car ce climat modifie le besoin thermique en chauffage du bâtiment et la ressource solaire disponible. Ainsi un algorithme génétique a été développé pour effectuer automatiquement ce dimensionnement optimal. Par ailleurs, un modèle électrique structuré en utilisant le formalisme de REM a servi de support pour développer des stratégies de gestion d'énergie. Deux stratégies de gestion ont d'ailleurs été développées et comparées, et démontrent qu'elles jouent un rôle très important dans le bon fonctionnement et la sécurité du système autonome. Enfin, le dernier chapitre a permis de se sensibiliser aux enjeux d'ordre éthique et environnemental via une approche par les « usages responsables » dans une étude de cas concrète au Canada, via un cas d'usage utilisant les produits d'une start-up française.

Ainsi ces travaux ont permis de montrer que la faisabilité économique d'un tel système était conditionné à la réduction de la consommation totale du bâtiment, notamment thermique. On pourrait envisager la mise sous forme d'application du dimensionnement optimal réalisé, ce qui permettrait l'utilisation de ces travaux par un public plus large et moins spécialiste.

D'un point de vue purement technique, il serait également intéressant de prendre en compte l'utilisation d'une pompe à chaleur ou de tout autre technologie capable de résoudre en partie le problème de la consommation importante du bâtiment en hiver. Par ailleurs, le modèle REM développé pour l'installation électrique du bâtiment autonome peut servir de support pour le

développement futur de nouvelles stratégies de gestion d'énergie, qui pourraient inclure l'ajout d'une intelligence artificielle capable de modifier dans le temps le besoin électrique du bâtiment, en utilisant des prises connectées par exemple. Enfin, un rapprochement avec des populations autochtones vivant actuellement sur sites isolés au Canada pourrait permettre de davantage mettre en perspective les enjeux éthiques et environnementaux en s'intéressant aux populations directement confrontées à la question centrale de l'autonomie en sites isolés.

## Liste des références

- [1] « Consommation d'énergie dans les bâtiments - chiffres clés 2013 ». Cerema Centre de ressources pour la chaleur et l'aménagement énergétique des territoires, janv-2014.
- [2] « Réglementation thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs ». Grenelle Environnement, avr-2011.
- [3] Y. Poissant, « Energie solaire dans les bâtiments à consommation énergétique nette zéro », avr-2015.
- [4] SLAOUI Abdelilah, « Électricité photovoltaïque Matériaux et marchés », *Tech. Ing. Énerg. Renouvelables*, vol. base documentaire : TIB594DUO, n° ref. article : be8579, avr 2016.
- [5] J. A. Duffie et W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth Edition. John Wiley & Sons, 2013.
- [6] Y. Le Bail, « SYSTÈME D'OPTIMISATION POUR ASSISTER LA CONCEPTION D'UN BATIMENT INTÉGRANT UNE INSTALLATION PHOTOVOLTAIQUE », 2009.
- [7] EnergyPlus, « Weather Data Sources ». US Departement of Energy's Building Technologies Office.
- [8] M. Guo *et al.*, « Optimal tilt angle and orientation of photovoltaic modules using HS algorithm in different climates of china », *Appl. Sci. Switz.*, vol. 7, n° 10, 2017.
- [9] Y. Q. Tian, R. J. Davies-Colley, P. Gong, et B. W. Thorrold, « Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect », *Agric. For. Meteorol.*, vol. 109, n° 1, p. 67-74, août 2001.
- [10] C. Zayane, « Identification d'un modèle de comportement thermique de bâtiment à partir de sa courbe de charge », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2011.
- [11] T. Berthou, « Développement de modèles de bâtiments pour la prévision de charge de climatisation et l'élaboration de stratégies d'optimisation énergétique et d'effacement », Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013.
- [12] F. GAL, « Simulation thermique dynamique (STD) – Maîtrise des consommations d'énergie », *Tech. Ing. Chauff. Clim. Eau Chaud Sanit.*, vol. base documentaire : TIB582DUO., n° ref. article : c8103, 2015.
- [13] N. Morel, « Energétique du bâtiment Calcul et modélisation d'un bâtiment - Simulation du comportement dynamique ».
- [14] J. A. Crabb, N. Murdoch, et J. M. Penman, « SIMPLIFIED THERMAL RESPONSE MODEL. », *Build. Serv. Eng. Res. Technol.*, vol. 8, n° 1, p. 13-19, 1987.
- [15] L. Danza *et al.*, « A Simplified Thermal Model to Control the Energy Fluxes and to Improve the Performance of Buildings », *ATI 2016 - 71st Conf. Ital. Therm. Mach. Eng. Assoc.*, vol. 101, n° Supplement C, p. 97-104, nov. 2016.
- [16] A. Chaudhuri, « Philosophical Dimensions of Information and Ethics in the Internet of Things (IoT) Technology », *EDPACS*, vol. 56, n° 4, p. 7-18, oct. 2017.
- [17] R. C. Arkin, « Ethics and Autonomous Systems: Perils and Promises », *Proc. IEEE*, vol. 104, n° 10, p. 1779-1781, 2016.
- [18] A. Etzioni et O. Etzioni, « AI assisted ethics », *Ethics Inf. Technol.*, vol. 18, n° 2, p. 149-156, 2016.
- [19] ERDF, « Règles relatives à la Programmation, au Mécanisme d'Ajustement et au dispositif de Responsable d'Equilibre ». 2015.

- [20] LHOMME Walter, DELARUE Philippe, BOUSCAYROL Alain, et BARRADE Philippe, « La REM, formalisme multiphysique de commande de systèmes énergétiques », *Tech. Ing. Outils Anal. En Électronique Puissance Métrologie*, vol. base documentaire : TIB278DUO, n° ref. article : d3066, nov. 2014.
- [21] K. S. Agbli, « Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM-Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire. », Université de Franche-Comté, 2012.
- [22] R. Dufo-López, J. L. Bernal-Agustín, et J. Contreras, « Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage », *Renew. Energy*, vol. 32, n° 7, p. 1102-1126, juin 2007.
- [23] M. Castañeda, A. Cano, F. Jurado, H. Sánchez, et L. M. Fernández, « Sizing optimization, dynamic modeling and energy management strategies of a stand-alone PV/hydrogen/battery-based hybrid system », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n° 10, p. 3830-3845, 2013.
- [24] S. Kwon, W. Won, et J. Kim, « A superstructure model of an isolated power supply system using renewable energy: Development and application to Jeju Island, Korea », *Renew. Energy*, vol. 97, n° Supplement C, p. 177-188, nov. 2016.
- [25] D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, et C. Elmasides, « Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, n° 16, p. 7081-7095, 2009.
- [26] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, et F. Jurado, « Optimal energy management system for stand-alone wind turbine/photovoltaic/hydrogen/battery hybrid system with supervisory control based on fuzzy logic », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n° 33, p. 14146-14158, nov. 2013.
- [27] J. P. F. Trovão, V. D. N. Santos, C. H. Antunes, P. G. Pereirinha, et H. M. Jorge, « A Real-Time Energy Management Architecture for Multisource Electric Vehicles », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, n° 5, p. 3223-3233, 2015.
- [28] J. P. Trovão, P. G. Pereirinha, H. M. Jorge, et C. H. Antunes, « A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles – An integrated rule-based meta-heuristic approach », *Appl. Energy*, vol. 105, n° Supplement C, p. 304-318, mai 2013.
- [29] B. K. Das, Y. M. Al-Abdeli, et G. Kothapalli, « Optimisation of stand-alone hybrid energy systems supplemented by combustion-based prime movers », *Appl. Energy*, vol. 196, p. 18-33, 2017.
- [30] Agency IE, Energy access database, « World Energy Outlook 2017 ». .
- [31] D. Feldman, G. Barbose, et R. Margolis, « Photovoltaic System Pricing Trends », U.S. Department of Energy, NREL/PR-6A20-64898, août 2015.
- [32] M. Salvador et S. Grieu, « Methodology for the design of energy production and storage systems in buildings: Minimization of the energy impact on the electricity grid », *Energy Build.*, vol. 47, p. 659-673, 2012.
- [33] H. Karunatilake, K. Hewage, W. Mérida, et R. Sadiq, « Renewable energy selection for net-zero energy communities: Life cycle based decision making under uncertainty », *Renew. Energy*, vol. 130, p. 558-573, 2019.
- [34] R. Hemmati et H. Saboori, « Stochastic optimal battery storage sizing and scheduling in home energy management systems equipped with solar photovoltaic panels », *Energy Build.*, vol. 152, p. 290-300, 2017.

- [35] B. Li, R. Roche, D. Paire, et A. Miraoui, « Sizing of a stand-alone microgrid considering electric power, cooling/heating, hydrogen loads and hydrogen storage degradation », *Appl. Energy*, vol. 205, p. 1244-1259, 2017.
- [36] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, et Z. Fang, « Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm », *Sol. Energy*, vol. 82, n° 4, p. 354-367, 2008.
- [37] D. Abbes, A. Martinez, et G. Champenois, « Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems », *Math. Comput. Simul.*, vol. 98, p. 46-62, 2014.
- [38] R. Wang, G. Li, M. Ming, G. Wu, et L. Wang, « An efficient multi-objective model and algorithm for sizing a stand-alone hybrid renewable energy system », *Energy*, vol. 141, p. 2288-2299, 2017.
- [39] M. Bianchi, L. Branchini, C. Ferrari, et F. Melino, « Optimal sizing of grid-independent hybrid photovoltaic-battery power systems for household sector », *Appl. Energy*, vol. 136, p. 805-816, 2014.
- [40] S. B. Jeyaprabha et A. I. Selvakumar, « Optimal sizing of photovoltaic/battery/diesel based hybrid system and optimal tilting of solar array using the artificial intelligence for remote houses in India », *Energy Build.*, vol. 96, p. 40-52, 2015.
- [41] P. Bacher et H. Madsen, « Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings », *Energy Build.*, vol. 43, n° 7, p. 1511-1522, 2011.
- [42] A. Gomes, C. Henggeler Antunes, et A. Gomes Martins, « “A multiple objective evolutionary approach for the design and selection of load control strategies” (IEEE Transactions on Power Systems (2004) (1173-1180)) », *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19, n° 4, p. 2124, 2004.
- [43] J. P. Trovão, M. A. Silva, C. H. Antunes, et M. R. Dubois, « Stability enhancement of the motor drive DC input voltage of an electric vehicle using on-board hybrid energy storage systems », *Appl. Energy*, vol. 205, p. 244-259, 2017.
- [44] G. Merei, C. Berger, et D. U. Sauer, « Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm », *Sol. Energy*, vol. 97, p. 460-473, 2013.
- [45] G. Ramos Ruiz, C. Fernández Bandera, T. Gómez-Acebo Temes, et A. Sánchez-Ostiz Gutierrez, « Genetic algorithm for building envelope calibration », *Appl. Energy*, vol. 168, p. 691-705, 2016.
- [46] E. Elbeltagi, T. Hegazy, et D. Grierson, « Comparison among five evolutionary-based optimization algorithms », *Adv. Eng. Inform.*, vol. 19, n° 1, p. 43-53, 2005.
- [47] R. Wu, G. Mavromatidis, K. Orehounig, et J. Carmeliet, « Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community », *Appl. Energy*, vol. 190, p. 634-649, 2017.
- [48] M. A. Lozano, J. C. Ramos, et L. M. Serra, « Cost optimization of the design of CHCP (combined heat, cooling and power) systems under legal constraints », *Energy*, vol. 35, n° 2, p. 794-805, 2010.
- [49] D. Abbes, A. Martinez, et G. Champenois, « Eco-design optimisation of an autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage », *IET Renew. Power Gener.*, vol. 6, n° 5, p. 358-371, 2012.



- [50] T. Khatib, A. Mohamed, et K. Sopian, « Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia », *Energy Build.*, vol. 47, p. 321-331, 2012.
- [51] R. Buffat, S. Grassi, et M. Raubal, « A scalable method for estimating rooftop solar irradiation potential over large regions », *Appl. Energy*, vol. 216, p. 389-401, 2018.
- [52] ENF Solar, « Annuaire Panneaux Solaires ».
- [53] M. Orosz, Q. Altes-Buch, A. Mueller, et V. Lemort, « Experimental validation of an electrical and thermal energy demand model for rapid assessment of rural health centers in sub-Saharan Africa », *Appl. Energy*, vol. 218, p. 382-390, 2018.
- [54] G. Capizzi, G. L. Sciuto, G. Cammarata, et M. Cammarata, « Thermal transients simulations of a building by a dynamic model based on thermal-electrical analogy: Evaluation and implementation issue », *Appl. Energy*, vol. 199, p. 323-334, 2017.
- [55] G. Fraisse, C. Viardot, O. Lafabrie, et G. Achard, « Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy », *Energy Build.*, vol. 34, n° 10, p. 1017-1031, 2002.
- [56] O. Schmidt, A. Gambhir, I. Staffell, A. Hawkes, J. Nelson, et S. Few, « Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 42, n° 52, p. 30470-30492, 2017.
- [57] A. Ganguly, D. Misra, et S. Ghosh, « Modeling and analysis of solar photovoltaic-electrolyzer-fuel cell hybrid power system integrated with a floriculture greenhouse », *Energy Build.*, vol. 42, n° 11, p. 2036-2043, 2010.
- [58] T. Zhou et B. Francois, « Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 34, n° 1, p. 21-30, 2009.
- [59] Mahytec, « Solutions de stockage de l'hydrogène ».
- [60] A. Bouscayrol, C. C. Chan, P. Barrade, et J. P. Trovão, « Energetic Macroscopic Representation », présenté à EMR'18 : Modelling and control using EMR, application to HEVs and others, Hanoï, Vietnam, 2018.
- [61] « Ressources naturelles Canada ».
- [62] S. Satyapal, J. Petrovic, C. Read, G. Thomas, et G. Ordaz, « The U.S. Department of Energy's National Hydrogen Storage Project: Progress towards meeting hydrogen-powered vehicle requirements », *Catal. Today*, vol. 120, n° 3-4 SPEC. ISS., p. 246-256, 2007.
- [63] SBC Energy Institute, « Hydrogen-Based Energy Conversion », févr. 2014.
- [64] I. Staffell et R. Green, « The cost of domestic fuel cell micro-CHP systems », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 38, n° 2, p. 1088-1102, 2013.
- [65] ENEDIS, « Consommation électrique par secteur d'activité ».
- [66] M. J. Brandemuehl et W. A. Beckman, « Transmission of diffuse radiation through CPC and flat plate collector glazings », *Sol. Energy*, vol. 24, n° 5, p. 511-513, 1980.
- [67] M. Trifkovic, M. Sheikhzadeh, K. Nigim, et P. Daoutidis, « Modeling and control of a renewable hybrid energy system with hydrogen storage », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, n° 1, p. 169-179, 2014.
- [68] Government of Canada, « Status of Remote/Off-Grid Communities in Canada », août 2011.
- [69] M. Soroush et D. J. Chmielewski, « Process systems opportunities in power generation, storage and distribution », *Comput. Chem. Eng.*, vol. 51, p. 86-95, 2013.

- [70] A. F. Ghoniem, « Needs, resources and climate change: Clean and efficient conversion technologies », *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 37, n° 1, p. 15-51, 2011.
- [71] D. B. Nelson, M. H. Nehrir, et C. Wang, « Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems », *Renew. Energy*, vol. 31, n° 10, p. 1641-1656, 2006.
- [72] G. Giannakoudis, A. I. Papadopoulos, P. Seferlis, et S. Voutetakis, « Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 35, n° 3, p. 872-891, 2010.
- [73] F. Valenciaga et P. F. Puleston, « Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy », *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, n° 2, p. 398-405, 2005.
- [74] W. Qi, J. Liu, X. Chen, et P. D. Christofides, « Supervisory predictive control of standalone wind/solar energy generation systems », *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 19, n° 1, p. 199-207, 2011.
- [75] Ø. Ulleberg, « The importance of control strategies in PV-hydrogen systems », *Sol. Energy*, vol. 76, n° 1-3, p. 323-329, 2004.
- [76] A. Bouscayrol, X. Guillaud, P. Delarue, et B. Lemaire-Semail, « Energetic macroscopic representation and inversion-based control illustrated on a wind-energy-conversion system using hardware-in-the-loop simulation », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, n° 12, p. 4826-4835, 2009.
- [77] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, et M.-C. Péra, « From modeling to control of a PEM fuel cell using energetic macroscopic representation », *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 6, p. 1882-1891, 2010.
- [78] T. Letrouvé, A. Bouscayrol, W. Lhomme, N. Dollinger, et F. Mercier Calvairac, « Different models of a traction drive for an electric vehicle simulation », présenté à 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010, 2010.
- [79] J. Voisin, M. Darnon, A. Jaouad, M. Volatier, J. Pedro Trovao, et V. Aimez, « Climate Impact on The Optimal Sizing of a Stand-Alone PV/Hydrogen/Battery-Based Hybrid Building », *Appl. Energy Submitt.*
- [80] W. Lhomme, P. Delarue, F. Giraud, B. Lemaire-Semail, et A. Bouscayrol, « Simulation of a Photovoltaic Conversion System using Energetic Macroscopic Representation », présenté à 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, 2012, p. DS3e.71-DS3e.76.
- [81] Ø. Ulleberg, « Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach », *Int. J. Hydrog. Energy*, vol. 28, n° 1, p. 21-33, janv. 2003.
- [82] S. Kelouwani, K. Agbossou, et R. Chahine, « Model for energy conversion in renewable energy system with hydrogen storage », *J. Power Sources*, vol. 140, n° 2, p. 392-399, 2005.
- [83] P. Thounthong, S. Pierfederici, J.-P. Martin, M. Hinaje, et B. Davat, « Modeling and control of fuel cell/supercapacitor hybrid source based on differential flatness control », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, n° 6, p. 2700-2710, 2010.
- [84] G. Lopez Lopez, R. Schacht Rodriguez, V. M. Alvarado, J. F. Gomez-Aguilar, J. E. Mota, et C. Sandoval, « Hybrid PEMFC-supercapacitor system: Modeling and energy management in energetic macroscopic representation », *Appl. Energy*, vol. 205, p. 1478-1494, 2017.

- [85] N. M. Souleman, O. Tremblay, et L.-A. Dessaint, « A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles », présenté à 5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09, 2009, p. 1722-1729.
- [86] B.-H. Nguyễn, J. P. Trovão, R. German, et A. Bouscayrol, « An Optimal Control-Based Strategy for Energy Management of Electric Vehicles Using Battery/Supercapacitor », présenté à 2017 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2017 - Proceedings, 2018, vol. 2018-January, p. 1-6.
- [87] N. Sulaiman, M. A. Hannan, A. Mohamed, P. J. Ker, E. H. Majlan, et W. R. Wan Daud, « Optimization of energy management system for fuel-cell hybrid electric vehicles: Issues and recommendations », *Appl. Energy*, vol. 228, p. 2061-2079, 2018.
- [88] J. P. Trovão, M. A. Silva, et M. R. Dubois, « Coupled energy management algorithm for MESS in urban EV », *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 7, n° 2, p. 125-134, 2017.
- [89] I. Ben Ali, M. Turki, J. Belhadj, et X. Roboam, « Optimized fuzzy rule-based energy management for a battery-less PV/wind-BWRO desalination system », *Energy*, vol. 159, p. 216-228, 2018.
- [90] L. W. Chong, Y. W. Wong, R. K. Rajkumar, et D. Isa, « An adaptive learning control strategy for standalone PV system with battery-supercapacitor hybrid energy storage system », *J. Power Sources*, vol. 394, p. 35-49, 2018.